POLITECHNIKA WARSZAWSKA Wydział Elektryczny

ROZPRAWA DOKTORSKA

mgr inż. Piotr Szulawski

Zintegrowany układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym

Promotor Prof. dr hab. inż. Włodzimierz Koczara

Warszawa, 2019

Pragnę przekazać najszczersze podziękowania profesorowi Włodzimierzowi Koczarze za inspirację, cenne uwagi oraz opiekę dydaktyczną nad prowadzonymi badaniami. Dziękuję również kolegom z Zakładu Napędu Elektrycznego oraz z działu R&D firmy APS Energia za wsparcie i miłą atmosferę.

Pragnę wyrazić wdzięczność mojej żonie Magdzie, synowi Wojciechowi i córce Natalii za wyrozumiałość i cierpliwość. Chciałbym również podziękować całej mojej rodzinie a zwłaszcza mamie za wsparcie przez wszystkie lata.

Streszczenie

W rozprawie zaprezentowano układ generacji mocy czynnej i biernej złożony z generatora synchronicznego, przekształtnika z magazynem energii oraz wspólnego układu regulacji. Przeprowadzono analizę możliwości powiększenia generowanej mocy oraz przeprowadzono analizę strat w generatorze synchronicznym w proponowanym układzie. W rozprawie zaproponowano układ regulacji dla pracy autonomicznej oraz modyfikację układu regulacji dla obciążeń asymetrycznych i nieliniowych. Szereg badań komputerowych wykazał poprawność działania układu regulacji, możliwość generacji zwiększonej mocy jak i możliwości stabilizacji prędkości i napięcia wyjściowego generatora synchronicznego. Zaproponowano układ regulacji mocy w przypadku współpracy układu z siecią elektroenergetyczną oraz przeprowadzono badania potwierdzające poprawność działania układu regulacji.

Słowa kluczowe: *synchrogenverter, generator synchroniczny, przekształtnik energoelektroniczny, regulacja prądu magazynu energii, stabilność generatora synchronicznego, straty generatora synchronicznego.*

Abstract

The dissertation presents an integrated power generation system that consists of a synchronous generator, a power electronic converter with energy storage and a common control system. Dissertation presents an analysis of increasing the generated power in proposed system and analysis of loss in a synchronous generator. The author proposes a control system for autonomous operation and modification of the control system for asymmetric and non-linear loads. Computer tests showed correct operation of the control systems. The ability to generate increased power is presented as well as the possibility of stabilizing the speed and output voltage of the synchronous generator. The proposed control system are presented.

Keywords: synchrogenverter, synchronous generator, power electronic converter, energy storage current control, synchronous generator stability, synchronous generator power losses.

Spis treści

1.	W	/stęp	9
2.	В	udowa i zasada działania generatora synchronicznego	. 12
	2.1	Model matematyczny generatora synchronicznego	. 12
	2.2	Równanie ruchu wirnika generatora synchronicznego	. 19
	2.3	Model matematyczny silnika Diesla	. 20
3.	W	ybrane metody regulacji generatora synchronicznego	. 22
	3.1	Metoda regulacji mocy czynnej i biernej generatora synchronicznego	
		współpracującego z siecią elektroenergetyczną	. 22
	3.2	Metoda regulacji generatora synchronicznego pracującego autonomicznie	. 26
4.	U	kład wytwarzania energii elektrycznej - Synchrogenverter	. 29
	4.1	Podstawowe założenia układu Synchrogenvertera	. 29
	4.2	Znamionowa moc układu Synchrogenvertera	. 32
	4.	2.1 Znamionowa moc układu Synchrogenvertera w przypadku zachowania stałej mocy biernej Q_{GN}	. 36
	4.	2.2 Znamionowa moc układu Synchrogenvertera w przypadku zachowania stałego współczynnika mocy cos(φ _{GN})	. 37
	4.3	Wyznaczenie strat w układzie Synchrogenvertera	. 39
	4.	3.1 Wyznaczenie strat w generatorze synchronicznym	. 39
	4.	3.2 Wyznaczenie sprawności przekształtnika	. 43
5.	P	raca autonomiczna układu Synchrogenvertera	. 45
	5.1	Metoda regulacji układu Synchrogenvertera pracującego autonomicznie	. 45
	5.2	Stany pracy układu Synchrogenvertera pracującego autonomicznie	. 52
	5.	2.1 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza moc bierną	. 53
	5.	2.2 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza moc czynną i bierną	. 54
	5.	2.3 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza moc bierną i pobiera moc czynną	. 56

5.2.4 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym generator synchroniczny i			
przekształtnik dostarcza moc czynną i bierną	56		
5.2.5 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza lub pobiera moc czynną	58		
5.3 Praca autonomiczna układu Synchrogenvertera zasilającego obciążenie symetryczne	59		
5.4 Praca układu Synchrogenvertera zasilającego odbiory o mocy przekraczającej moc znamionową generatora synchronicznego	72		
5.5 Praca układu Synchrogenvertera zasilającego odbiory niesymetryczne i nieliniowe	74		
6. Współpraca układu Synchrogenvertera z siecią elektroenergetyczną	82		
6.1 Metoda regulacji układu Synchrogenvertera współpracującego z siecią elektroenergetyczną	82		
7. Podsumowanie i wnioski	89		
Załączniki			
Literatura			

1. Wstęp

Generator synchroniczny jest obecnie najczęściej używany do generacji mocy czynnej i biernej w elektrowniach, gdzie współpracują z siecią elektroenergetyczną, jak i w przypadku układów pracujących autonomicznie. Generator synchroniczny jest najbardziej rozpowszechniony z powodu możliwości generacji mocy czynnej jak i biernej bez konieczności dodawania dodatkowych układów np. energoelektronicznych jak w przypadku generatorów indukcyjnych [C4, T1]. Generator synchroniczny, poprzez łatwą możliwość regulacji mocy biernej [S1], jest używany np. do kompensacji mocy biernej [M2]. Jednak generacja mocy biernej wiąże się z dodatkowymi stratami w generatorze synchronicznym, w uzwojeniu stojana jak i w uzwojeniu wzbudzenia. Możliwość generacji moczy czynnej i biernej powoduje, że generator synchroniczny jest stosowany w przypadku pracy autonomicznej gdzie konieczna jest stabilność i niezawodność.

Do generacji napięcia, o określonych parametrach, generator synchroniczny wymaga stałej prędkości maszyny napędowej. W przypadku agregatów prądotwórczych stałość prędkości zapewnia maszyna napędowa, jaką może być silnik Diesla. Agregaty takie używane są głównie, gdy niezbędna jest praca autonomiczna z ciągłym bądź długotrwałym zapotrzebowaniem na moc. W przypadku współpracy generatora synchronicznego z siecią elektroenergetyczną maszyną napędową jest najczęściej turbina gazowa lub parowa.

Generatory synchroniczne używane są w większości elektrowni wielkich mocy. Używane są przez wzgląd na ich wysoką sprawność podczas generacji mocy bliskiej mocy znamionowej. Generatory synchroniczne wymagają zabezpieczeń od za wysokiego oraz za niskiego napięcia wyjściowego, przeciążenia, zwarcia itd. [2]. W przypadku współpracy z siecią elektroenergetyczną generator synchroniczny musi być zabezpieczony przed wypadnięciem z synchronizmu, możliwym po zmianie obciążenia lub zwarciu na wyjściu.

W przypadku pracy autonomicznej zmniejszenie napięcia wywołane np. rozruchem silnika indukcyjnego może prowadzić do zahamowania wirnika generatora [S2]. Wówczas niezbędne jest przewymiarowanie generatora tylko w celu zapewnienia rozruchu silnika indukcyjnego. Zwiększona moc nie jest wykorzystywana natomiast w przypadku uruchomionego już silnika indukcyjnego. Praca z obciążeniem mniejszym od znamionowego charakteryzuje się zmniejszoną sprawnością generatora oraz silnika napędowego. Podobnie zmienne obciążenie generatora synchronicznego również wymaga zastosowania generatora synchronicznego o odpowiednio większej mocy znamionowej, wykorzystywanej tylko

podczas największego obciążenia a przy odciążeniu zmniejszy się sprawność generatora i silnika napędowego.

Rozwój generatora synchronicznego opiera się głównie na ulepszeniu układów wzbudzenia jak np. elektroniczna regulacja prądu wzbudzenia lub szybsze odwzbudzanie generatora [L1, L3, M1, M2, P1, P2, S1] jak również na zmianach konstrukcyjnych jak chłodzenie uzwojeń, lub zatapianie całego generatora w chłodziwie [G1, K9, K10].

Generator synchroniczny wytwarza napięcie przemienne, którego wartość chwilowa jest funkcją położenia wirnika i wartości strumienia magnesującego. Zatem nie zapewnia możliwości szybkiej regulacji wartości chwilowych wytwarzanego napięcia podczas coraz większej liczby nieliniowych odbiorników, zmieniających swe parametry, wywołujących powstawanie harmonicznych prądu.

Wobec braku postępu w redukcji niekorzystnych cech generatora synchronicznego oraz zwiększonego zapotrzebowania odbiorów na napięcie o stabilnej częstotliwości i amplitudzie [D1, E1, M3] opracowano i przeprowadzono analizę, co jest celem niniejszej rozprawy, modyfikacji układu wytwarzania energii z generatorem synchronicznym poprzez dołaczenie przekształtnika energoelektronicznego przy czym do stojana jest przyłączone wyjście wielofazowe przekształtnika, a wyjście napięcia stałego zawiera magazyn energii elektrycznej. Metoda regulacji pracy zakłada, ze przekształtnik energoelektroniczny wytwarza regulowane źródło prądowe, wpływające na dystrybucję prądu generatora, który jest głównie pradem czynnym a równoległy przekształtnik transferuje do odbiornika energię bierną oraz zapewnia dwukierunkowy przepływ energii pomiędzy generatorem, magazynem energii oraz odbiornikiem. Skojarzone funkcjonowanie równolegle połączonego generatora i przekształtnika pozwala na wybór najkorzystniejszego zakresu działania podzespołu a ponadto zmniejsza zasadniczo prąd wzbudzenia, co ułatwi i uprości konstrukcję wirnika poprzez zmniejszenie strat w wirniku oraz zmniejszy czasy regulacji pradu wzbudzenia. Opracowaną topologię równolegle połączonych źródeł nazwano Synchrogenverterem.

Rozprawa składa się z siedmiu rozdziałów gdzie każdy z rozdziałów porusza specyficzne zagadnienia związane z generatorem synchronicznym. Rozdziały od czwartego do siódmego przedstawiają koncepcję oraz analizę pracy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej.

- W rozdziale pierwszym przedstawiono cele oraz strukturę pracy.

 W rozdziale drugim przedstawiono modele matematyczne generatora synchronicznego oraz silnika Diesla, zdefiniowano układy współrzędnych. Omówiono metodę wyznaczania napięcia indukowanego w generatorze synchronicznym.

– W rozdziale trzecim przedstawiono schematy regulacji generatorów synchronicznych w pracy autonomicznej i współpracy z siecią elektroenergetyczną, oraz przedstawiono poszczególne bloki regulacji napięcia. Omówiono również proces regulacji wyjściowego napięcia podczas zmiany obciążenia lub zmiany zadanych mocy.

– W rozdziale czwartym opisano zintegrowany układ wytwarzania energii elektrycznej zwany Synchrogenverter. Przedstawiono schemat ogólny oraz zasadę działania jak i podstawowe założenia układu regulacji. Zdefiniowano układ współrzędnych używany podczas analizy i w układzie regulacji układu. Przedstawiono wyznaczenie mocy znamionowej układu Synchrogenvertera dla przypadku zachowania znamionowej mocy biernej generatora synchronicznego oraz dla przypadku zachowania znamionowego współczynnika mocy. Przedstawiono również wyliczenia zmniejszenia strat w rdzeniu, wirniku oraz stojanie generatora synchronicznego pracującego w układzie Synchrogenvertera. Wyznaczono również minimalną sprawność przekształtnika w celu zachowania strat na poziomie klasycznego generatora synchronicznego.

– W rozdziale piątym przedstawiono i omówiono układ regulacji generatora, przekształtnika i magazynu energii w układzie Synchrogenvertera podczas pracy autonomicznej. Omówiono przykład regulacji napięcia wyjściowego podczas zmiany obciążenia. Przedstawiono możliwe stany pracy w zależności od generowanej mocy czynnej lub biernej. W podrozdziale 5.3 przedstawione są badania komputerowe potwierdzające poprawność działania układu Synchrogenvertera jak. Omówiony jest wpływ dostarczenia chwilowej mocy czynnej przez magazyn energii na zmianę momentu elektromagnetycznego generatora synchronicznego, co w efekcie umożliwia regulację oraz stabilizację prędkości generatora synchronicznego. Przedstawiono porównanie wartości generatora synchronicznego klasycznego oraz pracującego w układzie Synchrogenvertera, które potwierdza obliczenia strat. W następnych podrozdziałach przedstawione są wyniki badań laboratoryjnych układu podczas zwiększonego obciażenia, obciażenia asymetrycznego oraz nieliniowego.

 W rozdziale szóstym przedstawiono pracę układu Synchrogenvertera podczas współpracy z siecią elektroenergetyczną. Przedstawiono układ regulacji oraz wyniki badań komputerowych w formie wykresów. Badania potwierdzają poprawność układu regulacji oraz prawidłowe działanie układu Synchrogenvertera współpracującego z siecią.

 Rozdział siódmy zawiera podsumowanie pracy oraz wnioski z przeprowadzonych badań komputerowych. Przedstawione są osiągnięcia autora.

2. Budowa i zasada działania generatora synchronicznego

2.1 Model matematyczny generatora synchronicznego

Model matematyczny generatora synchronicznego opisuje zależności prądów i napięć występujących w generatorze. W modelu matematycznym zakłada się, że uzwojenia stojana są symetryczne, indukcyjności i rezystancje uzwojeń stojana są stałe, pomija się nasycenie oraz histerezę obwodów magnetycznych [C2, H1, L4, M4, P5].

Wirnik generatora synchronicznego składa się z uzwojenia wzbudzenia i uzwojeń tłumiących podłużnego D i poprzecznego Q przesuniętych między sobą o kąt $\pi/2$. Uzwojenia a, b, c trójfazowego stojana (Rys. 2.1.1a) można zastąpić dwufazowym układem współrzędnych *dq* wirującym zgodnie z wirnikiem (Rys. 2.1.1b). W przypadku generatora synchronicznego z biegunami wydatnymi występuje asymetria magnetyczna wywołana konstrukcją maszyny, co w efekcie przekłada się na zmienne indukcyjności własne i wzajemne generatora. Asymetrie te są zależne od kąta położenia wirnika tak, że w układzie współrzędnych wirujących *dq* wartości indukcyjności są stałe [H1, L4, M4, P5].

Uwzględniając powyższe założenia zgodnie z modelem z Rys. 2.1.1b można napisać wzór na napięcia stojana maszyny synchronicznej w postaci wektorowej:

$$\boldsymbol{u}_g = R_g \boldsymbol{i}_g + \frac{d}{dt} \boldsymbol{\Psi}_g \tag{2.1.1}$$



Rys. 2.1.1 Obwody zastępcze generatora synchronicznego.

Gdzie w układzie współrzędnych naturalnych abc:

$$\boldsymbol{u}_{g} = \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \\ u_{f} \\ u_{D} \\ u_{Q} \end{bmatrix}, R_{g} = \begin{bmatrix} R_{s} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & R_{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{f} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{D} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{Q} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{i}_{g} = \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \\ i_{f} \\ i_{D} \\ i_{O} \end{bmatrix}, \ \boldsymbol{\Psi}_{g} = \begin{bmatrix} \Psi_{ga} \\ \Psi_{gb} \\ \Psi_{gc} \\ \Psi_{gc} \\ \Psi_{gc} \\ \Psi_{D} \\ \Psi_{D} \\ \Psi_{D} \end{bmatrix}$$

 u_{ga} , u_{gb} , u_{gc} – chwilowe wartości napięć przyłożonych do uzwojeń stojana w układzie współrzędnych *abc*,

 i_{ga} , i_{gb} , i_{gc} – chwilowe wartości prądów uzwojenia stojana w układzie współrzędnych *abc*,

 u_{f_2} – chwilowa wartość napięcia uzwojenia wzbudzenia,

 i_{f_2} – chwilowa wartość prądu płynącego w uzwojeniu wzbudzenia,

 u_D , u_Q – chwilowe wartości napięć uzwojeń tłumiących,

 i_D , i_Q – chwilowe wartości prądów w uzwojeniach tłumiących,

 ψ_{ga} , ψ_{gb} , ψ_{gc} – chwilowe wartości strumieni uzwojeń stojana w układzie współrzędnych abc,

 ψ_f – chwilowa wartość strumienia wzbudzenia,

 ψ_D , ψ_Q – chwilowe wartości strumieni uzwojeń tłumiących.

Oraz wzór na strumienie magnetyczne:

$$\boldsymbol{\mathcal{V}}_{g} = \boldsymbol{L}_{g_abc} \cdot \boldsymbol{i}_{g} \tag{2.1.2}$$

Gdzie L_{g_abc} – macierz indukcyjności generatora we współrzędnych *abc*

$$L_{g_abc} = \begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} & M_{af} & M_{aD} & M_{aQ} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} & M_{bf} & M_{bD} & M_{bQ} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c & M_{cf} & M_{cD} & M_{cQ} \\ M_{af} & M_{bf} & M_{cf} & L_f & M_{fD} & 0 \\ M_{aD} & M_{bD} & M_{cD} & M_{fD} & L_D & 0 \\ M_{aQ} & M_{bQ} & M_{cQ} & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$

La, Lb, Lc – indukcyjności własne uzwojeń stojana,

L_f, – indukcyjność uzwojenia wzbudzenia,

 L_D , L_Q – indukcyjności własne uzwojeń tłumiących,

Mab, Mbc, Mac - indukcyjności wzajemne między uzwojeniami stojana,

 M_{af} , M_{bf} , M_{cf} – indukcyjności wzajemne między uzwojeniami stojana i uzwojeniem wzbudzenia,

 M_{aD} , M_{bD} , M_{cD} – indukcyjności wzajemne między uzwojeniami stojana i uzwojeniem tłumiącym podłużnym,

 M_{aQ} , M_{bQ} , M_{cQ} – indukcyjności wzajemne między uzwojeniami stojana i uzwojeniem tłumiącym poprzecznym.

Większość indukcyjności własnych i wzajemnych jest funkcją kąta położenia wirnika generatora γ . Zapis poszczególnych indukcyjności można znaleźć w literaturze [L4, P5, C2]. Układ współrzędnych dq wirujący zgodnie z wirnikiem generatora synchronicznego powoduje, że wartości indukcyjności mają wartości stałe lub równe zero. Indukcyjności wzajemne występują tylko między uzwojeniami w tej samej osi. Ponieważ osie d i q są przesunięte o kąt $\pi/2$ nie występują między nimi indukcyjności wzajemne.

W układzie współrzędnych *dq* wirujących zgodnie z wirnikiem równania napięciowe uzwojeń przyjmują postać:

$$u_{gd} = R_s \cdot i_{gd} - \omega \cdot \psi_{gq} + \frac{d\psi_{gd}}{dt}$$
(2.1.3)

$$u_{gq} = R_s \cdot i_{gq} + \omega \cdot \psi_{gd} + \frac{d\psi_{gq}}{dt}$$
(2.1.4)

$$u_{g0} = R_s \cdot i_{g0} + \frac{d\psi_{g0}}{dt}$$
(2.1.5)

$$u_f = R_f \cdot i_f + \frac{d\psi_f}{dt} \tag{2.1.6}$$

$$u_D = R_D \cdot i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \tag{2.1.7}$$

$$u_Q = R_Q \cdot i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \tag{2.1.8}$$

Gdzie:

 u_{gd} , u_{gq} , u_{g0} – chwilowe wartości napięć przyłożonych do uzwojeń stojana w układzie współrzędnych dq,

 i_{gd} , i_{gq} , i_{gq} , i_{g0} – chwilowe wartości prądów uzwojeń stojana w układzie współrzędnych dq,

 ω – prędkość wirowania strumienia wzbudzenia,

 ψ_{gd} , ψ_{gq} , ψ_{g0} – chwilowe wartości strumieni uzwojeń stojana w układzie współrzędnych dq,

Wartości dla uzwojenia wirnika i uzwojeń tłumiących nie zmieniają się, ponieważ nie zależą od położenia wirnika.

Macierz indukcyjności generatora L_{g_dq} we współrzędnych dq można zapisać, jako:

$$L_{g_dq} = \begin{bmatrix} L_d & 0 & 0 & M_{df} & M_{dD} & 0\\ 0 & L_q & 0 & 0 & 0 & M_{qQ}\\ 0 & 0 & L_0 & 0 & 0 & 0\\ \frac{3}{2}M_{df} & 0 & 0 & L_f & M_{fD} & 0\\ \frac{3}{2}M_{dD} & 0 & 0 & M_{fD} & L_D & 0\\ 0 & \frac{3}{2}M_{qQ} & 0 & 0 & 0 & L_Q \end{bmatrix}$$
(2.1.9)

Gdzie:

 L_d , L_q , L_0 – indukcyjność synchroniczne podłużna, poprzeczna i indukcyjność zerowa,

 M_{df} – indukcyjność wzajemna obwodu podłużnego i obwodu wzbudzenia,

 M_{dD} – indukcyjność wzajemna obwodu podłużnego i obwodu podłużnego tłumienia,

 M_{fD} – indukcyjność wzajemna obwodu wzbudzenia i obwodu podłużnego tłumienia,

 M_{qQ} – indukcyjność wzajemna obwodu poprzecznego i obwodu poprzecznego tłumienia.

Współczynniki 3/2 występują przy indukcyjnościach wzajemnych obwodów wirnika skojarzonych z obwodami stojana, których prądy są transformowane do układu współrzędnych dq. Wszystkie indukcyjności własne i wzajemne macierzy L_{g_dq} są stałe, niezależne od kąta położenia wirnika.

W celu analizy wektorowej oraz uproszczenia obliczeń wprowadza się definicję reaktancji jako iloczyn poszczególnych indukcyjności i prędkości synchronicznej ω_s . Podstawowe reaktancje to reaktancja w osi podłużnej $X_{gd} = \omega_s L_d$ oraz reaktancja w osi poprzecznej $X_{gq} = \omega_s L_q$. Reaktancje synchroniczne są podawane przez producenta w danych generatora synchronicznego jak w [4]. Wykres wektorowy dla generatora z biegunami utajonymi gdzie $X_{gd} = X_{gq}$ i wydatnymi gdzie $X_{gd} > X_{gq}$ przedstawia Rys. 2.1.2. Oś *d* jest zgodna z wektorem strumienia wzbudzenia, zatem indukowane napięcie w generatorze w stanie ustalonym ma tylko składową w osi *q*: $e_g = je_{gq} = jE_f$. Podczas gdy płynie prąd obciążenia $i_g = i_{gd} + ji_{gq}$ napięcie generatora $u_g = u_{gd} + ju_{gq}$ jest przesunięte względem napięcia indukowanego o kąt δ_q [H1].



Rys. 2.1.2 Wykres wektorowy dla generatora synchronicznego z biegunami a) wydatnymi, b) utajonymi.

Zapis wektorowy strumieni magnetycznych we współrzędnych dq:

$$\psi_{gd} = L_d \cdot i_{gd} + M_{df} \cdot i_f + M_{dD} \cdot i_D \tag{2.1.10}$$

$$\psi_{gq} = L_q \cdot i_{gq} + M_{qQ} \cdot i_Q \tag{2.1.11}$$

$$\psi_{g0} = L_0 \cdot i_{g0} \tag{2.1.12}$$

$$\psi_f = \frac{3}{2} M_{df} \cdot i_{gd} + L_f \cdot i_f + M_{fD} \cdot i_D$$
(2.1.13)

$$\psi_D = \frac{3}{2} M_{dD} \cdot i_{gd} + M_{fD} \cdot i_f + L_D \cdot i_D$$
(2.1.14)

$$\psi_Q = \frac{3}{2} M_{qQ} \cdot i_q + L_Q \cdot i_Q \tag{2.1.15}$$

Uwzględniając równania napięciowe i równania strumieni generator synchroniczny można zamodelować, jako zastępczy schemat elektryczny we współrzędnych dq, przedstawiony na Rys. 2.1.3. Indukcyjności magnesujące L_{md} , L_{mq} i indukcyjności rozproszenia $L_{s\sigma}$, $L_{D\sigma}$, $L_{f\sigma}$, reprezentują indukcyjności poszczególnych uzwojeń na schemacie zastępczym.



Rys. 2.1.3 Schemat zastępczy generatora synchronicznego we współrzędnych dq, a) schemat zastępczy dla składowej d, b) schemat zastępczy dla składowej q, c) schemat dla składowej 0.

Przedstawione na rysunku indukcyjności są wyznaczane z indukcyjności modelu we współrzędnych *dq*. Wyliczenie poszczególnych indukcyjności przedstawione jest między innymi w [L4, P5, C2]. Indukcyjności można wyznaczyć ze wzorów:

$$M_{df} = M_{dD} = M_{fD} = L_{md} (2.1.16)$$

$$M_{qQ} = L_{mq} \tag{2.1.17}$$

$$L_{s\sigma} = L_d - L_{md} \tag{2.1.18}$$

$$L_{s\sigma} = L_q - L_{mq} \tag{2.1.19}$$

$$L_{f\sigma} = L_F - L_{md} \tag{2.1.20}$$

$$L_{D\sigma} = L_D - L_{md} \tag{2.1.21}$$

 $L_{Q\sigma} = L_Q - L_{mq} \tag{2.1.22}$

Gdzie: L_{md} – indukcyjność magnesująca w osi d, L_{mq} – indukcyjność magnesująca w osi q, $L_{s\sigma}$ – indukcyjność rozproszenia uzwojenia stojana, $L_{f\sigma}$ – indukcyjność rozproszenia uzwojenia tłumiącego podłużnego, $L_{Q\sigma}$ – indukcyjność rozproszenia uzwojenia tłumiącego podłużnego,

Do analizy pracy generatora synchronicznego używany jest wektor indukowanego napięcia w stojanie generatora $e_g = e_{gd} + je_{gq}$. Wektor dla stanu ustalonego przy obciążeniu generatora prądem $i_g = i_{gd} + ji_{gq}$ wyznaczyć można ze wzoru 2.1.23.

$$\boldsymbol{u}_g = \boldsymbol{e}_g - R_s \boldsymbol{i}_g - j X_{gd} \boldsymbol{i}_{gd} - j X_{gq} \boldsymbol{i}_{gq}$$
(2.1.23)

Gdzie i_{gd} wektor składowej prądu generatora w osi d, i_{gq} wektor składowej prądu generatora w osi q. Przekształcając powyższy wzór oraz zastępując równania zespolone równaniami rzeczywistymi otrzymano:

$$e_{gd} = u_{gd} + R_s i_{gd} + X_{gq} i_{gq} = 0 (2.1.24)$$

$$e_{gq} = u_{gq} + R_s i_{gq} - X_{gd} i_{gd} = E_f (2.1.25)$$

W układzie współrzędnych dq gdzie oś d wiruje zgodnie z wektorem strumienia wzbudzenia napięcie indukowane występuje jedynie w osi q.

Wyznaczenie napięcia indukowanego możliwe jest z wartości napięcia na zaciskach generatora oraz obciążenia generatora mocą $S_g = P_g + jQ_g$ [M4]. Wyznaczając ze wzoru (2.1.23) napięcie indukowane e_g :

$$\boldsymbol{e}_{g} = \boldsymbol{u}_{g} + R_{s}\boldsymbol{i}_{g} + jX_{gq}\boldsymbol{i}_{g} + j(X_{gd} - X_{gq})\boldsymbol{i}_{gd} = \boldsymbol{e}_{Q} + j(X_{gd} - X_{gq})\boldsymbol{i}_{gd}$$
(2.1.26)

Gdzie e_Q - jest fikcyjnym napięciem leżącym na osi q odpowiadającym napięciu indukowanemu w przypadku, gdy $X_{gd} = X_{gq}$.

$$\boldsymbol{e}_{Q} = \boldsymbol{u}_{g} + R_{s}\boldsymbol{i}_{g} + jX_{gq}\boldsymbol{i}_{g}$$
(2.1.27)

Wyznaczenie wektora e_Q jest pomocne w wyznaczeniu napięcia indukowanego, ponieważ wyznacza oś q współrzędnych dq. W początkowej fazie obliczeń przyjmuje się, że wektor napięcia ma tylko składową rzeczywistą $u_g = u_g$. Wyznaczenie wektora jest możliwe przy znajomości prądu generatora i_g oraz jego argumentu. Wartość prądu można wyznaczyć z mocy wyjściowej generatora:

$$|\mathbf{i}_g| = \frac{S_g}{3u_g} \tag{2.1.28}$$

$$\arg(\mathbf{i}_g) = \varphi_g = -\arctan\frac{Q_g}{P_g}$$
(2.1.29)

Następnie ze wzoru (2.1.30) wyznacza się argument wektora napięcia \boldsymbol{e}_Q ,

$$\arg(\boldsymbol{e}_{\mathcal{Q}}) = \delta_{g} = \arctan\left(\frac{R_{s}Q_{g} + X_{gq}P_{g}}{3u_{g}^{2} + R_{s}P_{g} - X_{gq}Q_{g}}\right)$$
(2.1.30)

Mając kąt napięcia indukowanego względem napięcia wyjściowego, czyli kąt δ_g możliwe jest wyznaczenie poszczególnych współrzędnych prądów i napięć:

$$i_{gd} = -|\mathbf{i}_g|\sin(\delta_g + \varphi_g)$$

$$i_{gq} = |\mathbf{i}_g|\cos(\delta_g + \varphi_g)$$

$$u_{gd} = -u_g\sin(\delta_g + \varphi_g)$$

$$u_{gq} = u_g\cos(\delta_g + \varphi_g)$$
(2.1.31)

Mając współrzędne napięć i prądów we współrzędnych dq można wyznaczyć napięcie indukowane ze wzoru (2.1.25).

Siła elektromotoryczna indukowana jest taka sama w każdej fazie stojana generatora synchronicznego i zależy od prądu wzbudzenia, prędkości i sprzężenia między uzwojeniami wzbudzenia i stojana [H1, L4, P5]. Amplituda siły elektromotorycznej wyraża się wzorem (2.1.32).

$$E_f = \omega_g M_{df} i_f \tag{2.1.32}$$

2.2 Równanie ruchu wirnika generatora synchronicznego

Do pełnego modelu generatora synchronicznego należy określić równanie ruchu wirnika. Ruch wirnika odbywa się zgodnie z drugą zasadą dynamiki [C2, M4, L4, P5]. Równanie można zapisać, jako:

$$\frac{d^2\delta_g}{dt^2} = \frac{d(\omega_g - \omega_S)}{dt} = \frac{p}{J_g} (T_m - T_e - T_D)$$
(2.2.1)

Gdzie:

 ω_S – prędkość synchroniczna generatora synchronicznego,

 ω_g - prędkość aktualna generatora synchronicznego,

 J_g – moment bezładności wirnika generatora synchronicznego,

 T_m – moment mechaniczny na wale maszyny napędzającej generator,

 T_e – moment elektromagnetyczny, moment hamujący wirnik,

 T_D – moment tłumiący ruch wirnika,

p – liczba par biegunów generatora synchronicznego,

Przekształcając 2.2.1 można wyznaczyć prędkość wału generatora synchronicznego:

$$\omega_g - \omega_s = \frac{p}{J_g} \int (T_m - T_e - T_D) dt$$
(2.2.2)

Moment elektromagnetyczny *Te* wytwarzany jest poprzez przepływający prąd przez uzwojenie stojana. Jest to moment hamujący wał maszyny napędowej podczas pobierania mocy czynnej na wyjściu generatora. Moment elektromagnetyczny wylicza się ze wzoru [C2]:

$$T_e = p \frac{3}{2} (\psi_{gd} i_{gq} - \psi_{gq} i_{gd})$$
(2.2.3)

Gdzie p – liczba par biegunów generatora synchronicznego.

Moment tłumiący ruch wirnika T_D pojawia się tylko podczas zmian prędkości i jest proporcjonalny do różnicy prędkości generatora ω_g i prędkości synchronicznej ω_s . Określony jest współczynnik tłumienia ruchu wirnika, jako D. Moment tłumienia wyraża się wzorem:

$$T_D = D \frac{(\omega_g - \omega_s)}{\omega_s} = D \frac{1}{\omega_s} \frac{d\delta_g}{dt}$$
(2.2.4)

Moment mechaniczny T_m jest wytworzony w maszynie napędowej, którą w większości przypadków pracy autonomicznej generatora jest silnik Diesla a w przypadku pracy na sieć turbina parowa, gazowa itp. [3, C2]. W rozprawie przyjęto silnik Diesla jako maszynę napędową z powodu szerszego zastosowania w agregatach prądotwórczych pracujących autonomicznie oraz mniejszych stałych czasowych mechanicznych.

2.3 Model matematyczny silnika Diesla

W większości przypadków pracy autonomicznej agregatów prądotwórczych maszyną napędzającą generator synchroniczny jest silnik Diesla. W przypadku pracy na SEE maszyną napędową jest zazwyczaj turbina dla wysokich mocy, lecz stałe czasowe turbin są dużo większe niż dla silnika Diesla [3]. W pracy za maszynę napędową przyjęto silnik Diesla z powodu szybszych zmian jak i szerszego stosowania w pracy autonomicznej. Występuje wiele modeli silnika Diesla do różnych zastosowań opisane szerzej w literaturze [3, C2]. Jednym z modeli matematycznych silnika Diesla jest model przedstawiony na Rys. 2.3.1. Model silnika Diesla składa się z wejścia wartości zadanej prędkości wału silnika ω_{g_zad} , który jest porównywany z aktualną wartością prędkości silnika ω_g . Sygnał uchybu prędkości podawany jest na wejście kontrolera. Kontroler ma za zadanie wyznaczenie wartości paliwa, która jest potrzebna, aby osiągnąć prędkość zadaną. Kontroler jest określony transmitancją G_k (2.3.1).

$$G_k = \frac{K_{pc}(1+T_{3c}s)}{1+T_{1c}s+T_{1c}T_{2c}s^2}$$
(2.3.1)

Gdzie: K_{pc} – wzmocnienie kontrolera, T_{1c} , T_{2c} , T_{3c} – stałe czasowe kontrolera.

Sygnał wyjściowy kontrolera jest podawany na wejście siłownika Aktuator, który wyrażony jest za pomocą transmitancji G_a (2.3.2), oraz z ograniczenia momentu mechanicznego możliwego do wytworzenia.

$$G_a = \frac{(1+T_{1a}s)}{s(1+T_{2a}s)(1+T_{3a}s)}$$
(2.3.2)

Maksymalny moment maszyny napędowej jest ograniczony do $T_{max} = 1.1$ momentu znamionowego generatora synchronicznego T_N , a minimalny do wartości $T_{min} = 0$. Sygnałem wyjściowym modelu jest moment wytworzony przez silnik T_m . Wartość momentu wyjściowego jest opóźniona o czas T_{ED} określający opóźnienie w systemie podawania paliwa. Moment mechaniczny odpowiada momentowi napędowemu generatora synchronicznego. Wyznaczony moment podawany jest do wzoru (2.2.2) wyznaczającego prędkość wału napędowego generatora.



Rys. 2.3.1 Schemat blokowy silnika Diesla.

3. Wybrane metody regulacji generatora synchronicznego

3.1 Metoda regulacji mocy czynnej i biernej generatora synchronicznego współpracującego z siecią elektroenergetyczną

Sieci elektroenergetyczne SEE zasilane są głównie poprzez dołączone do nich generatory synchroniczne. Układy regulacji generatorów mają istotny wpływ na stabilność SEE oraz jakość dostarczanego napięcia [2, M4, P2]. W przypadku dołączenia generatora synchronicznego do sieci elektroenergetycznej SEE można przyjąć stałe napięcie wyjściowe generatora synchronicznego równe napięciu SEE. Schemat ogólny układu regulacji generatora synchronicznego przedstawia (Rys. 3.1.1).

Maszyna napędowa w przypadku pracy na SEE utrzymuje stałą prędkość wału. Zwiększenie momentu mechanicznego powoduje zwiększenie mocy turbiny, które powoduje zwiększenie kąta położenia wirnika δ_g względem napięcia sieci. Zwiększenie kąta δ_g między wektorami napięcia indukowanego e_g i napięcia sieci u_s powoduje zwiększenie napięcia na reaktancji generatora co powoduje zwiększenie prądu wyjściowego generatora. Większy prąd wyjściowy powiększa wartość generowanej mocy czynnej do SEE. Zmniejszenie momentu powoduje zmniejszenie generowanej mocy. Umożliwia to regulację mocy czynnej poprzez zmianę mocy wejściowej maszyny napędowej, czyli zmianę momentu mechanicznego. Generatory dużych mocy lub grupa generatorów w elektrowniach mają możliwość w niewielkim zakresie zmiany częstotliwości napięcia SEE [M4].



Rys. 3.1.1 Schemat ogólny układu regulacji generatora synchronicznego współpracującego z siecią elektroenergetyczną SEE.

Obecnie regulator wzbudzenia poza regulacją napięcia wyjściowego generatora ma za zadanie ograniczać wartości wyjściowe generatora oraz wartości wzbudzenia, ochronę generatora przed naruszeniem warunków współpracy z SEE, tłumienie kołysań występujących w SEE [2]. Ogólny schemat regulatora wzbudzenia generatora synchronicznego współpracującego z SEE przedstawiono na Rys. 3.1.2. Szczegółowe układy wzbudzenia można znaleźć w literaturze [2, P1, C2, L3, M1].



Rys. 3.1.2 Schemat blokowy regulatora wzbudzenia generatora synchronicznego współpracującego z SEE.

Regulator wzbudzenia AVR przy współpracy z SEE musi mieć możliwość regulacji modułu napięcia wyjściowego generatora $|u_g|$. Jest to używane podczas rozruchu generatora synchronicznego, procesu synchronizacji, lub w przypadku generatorów dużej mocy do utrzymania odpowiedniego napięcia sieci SEE. W przypadku generatorów mniejszych mocy napięcie wyjściowe jest równe napięciu sieci SEE i regulator ma za zadanie utrzymać moc bierną wyjściową równą zadanej $Q_g = Q_{g zad}$ lub stały współczynnik mocy cos $\varphi_g = \cos\varphi_{g zad}$.

Blok PSS jest blokiem stabilizatora systemowego (ang. Power System Stabilizer) [2], który pracuje podczas stanów nieustalonych. PSS zmniejsza uchyb wartości wejściowej regulatora napięcia generatora tak, aby zmniejszyć kołysania wirnika. Regulator PSS przeciwdziała regulatorowi napięcia generatora i te dwa regulatory muszą być odpowiednio dobrane tak, aby osiągnąć kompromis między kołysaniami wirnika i regulacją napięcia wyjściowego. Niekiedy blok PSS jest pomijany po analizie wyjściowego napięcia dla danego generatora. Regulator PSS zastosowany w badaniach przedstawiono na rysunku 3.1.3. Stabilizator systemowy składa się kolejno z członu różniczkującego, członów korekcyjnych,

członu wzmacniającego i członu ogranicznika wyjściowego sygnału. Wartości poszczególnych członów podane są w załączniku A.1 w tabeli A.1.6.



Rys. 3.1.3 Schemat blokowy stabilizatora systemowego (PSS).

Wykres wektorowy generatora synchronicznego współpracującego z SEE przy zmianie generowanej mocy czynnej i biernej przedstawia Rys. 3.1.4. W początkowym stanie napięcie indukowane jest zsynchronizowane z napięciem sieci $e_{g\theta} = u_s$. Między napięciami sieci i siły elektromotorycznej nie ma przesunięcia fazowego i są równe co do modułu, więc nie płynie prąd w uzwojeniach stojana. W pewnej chwili czasowej następuje zwiększenie prądu wzbudzenia, co powoduje zwiększenie amplitudy napięcia indukowanego do wartości e_{gl} . Napięcie indukowane jest w fazie z napięciem sieci, zatem przy pominięciu rezystancji cała różnica napięć odłoży się na indukcyjności generatora. Prąd wyjściowy jest przesunięty o kąt $\varphi_1 = \pi/2$ zatem z punktu widzenia SEE dostarczana jest moc bierna indukcyjna. Następnie zwiększono moc mechaniczną, co jest spowodowane zwiększeniem momentu mechanicznego maszyny napędowej. Zatem zgodnie z (2.2.1) zwiększenie momentu mechanicznego powoduje przyspieszenie wirnika do chwili, gdy w stanie ustalonym moc mechaniczna jest równa mocy czynnej generatora, pomijając straty mocy w generatorze. Zwiększenie momentu napędowego powoduje zwiększenie kąta między wektorem napięcia indukowanego i wektorem napięcia sieci $\delta_{g2} > 0$. W pewnej chwili następuje zadanie większej mocy biernej lub większego współczynnika mocy wyjściowej cosq_{g3} co powoduje zwiększenie prądu wzbudzenia. Zwiększenie prądu wzbudzenia zgodnie z (2.1.32) powoduje zwiększenie amplitudy napięcia indukowanego $|e_{g3}| > |e_{g2}|$. Napięcie indukowane e_{g3} powoduje zwiększenie prądu wyjściowego do wartości i_{g3} .



Rys. 3.1.4 Wykres wektorowy dla generatora synchronicznego współpracującego z SEE przy zmianach prądu wzbudzenia i mocy mechanicznej.

Zwiększenie długości wektora napięcia indukowanego powoduje jednak nieznaczne zwiększenie prądu czynnego generowanego przez generator. Większa moc czynna generowana przez generator powoduje zwiększenie momentu hamującego wirnik generatora, co w efekcie zmniejsza kąt położenia wirnika $\delta_{g4} < \delta_{g2}$. Hamowanie wirnika generatora trwa do czasu, w którym moc czynna pobierana jest równa momentowi napędowemu.

Na Rys. 3.1.4 prądy w osi x generatora synchronicznego i_{g2} i i_{g4} są sobie równe. Jest to spowodowane generacją tej samej mocy czynnej, co odpowiada temu samemu momentowi napędowemu. Można, zatem stwierdzić, że wszystkie wektory napięcia indukowanego e_g , którego koniec znajduje się na linii przerywanej powodują generowanie jednej wartości mocy czynnej (Rys. 3.1.5a), pomijając straty w generatorze synchronicznym. Linia przerywana jest równoległa do wektora napięcia wyjściowego u_s . Można również określić linię stałej mocy biernej jak na (Rys. 3.1.5b), która jest prostopadła do wektora napięcia u_s .



Rys. 3.1.5 Wykres wektorowy dla generatora synchronicznego współpracującego z SEE, a) dla stałej mocy czynnej, b) dla stałej mocy biernej.

3.2 Metoda regulacji generatora synchronicznego pracującego autonomicznie

Generator synchroniczny pracując autonomizmie nie posiada stałego napiecia na wyjściu generatora jak w przypadku współpracy z SEE. Aby wyjściowe napięcie generatora było stałe niezależnie od pradu w generatorze stosuje się układ regulacji pradu wzbudzenia AVR (ang. Automatic Voltage Regulator) [2, C2, L1, L3, M1, M2, M4, P1, Z1]. Układ regulacji ma za zadanie zmianę wartości prądu wzbudzenia w zależności od wyjściowego pradu generatora. Wyjściowe napiecie generatora, jako napiecie zasilające dla odbiorców nie powinno zmieniać swoich parametrów [M3]. Napięcie wyjściowe musi mieć stałą wartość amplitudy jak i stałą wartość częstotliwości w stanie ustalonym. Regulacja amplitudy napięcia wyjściowego odbywa się poprzez zmianę prądu wzbudzenia przez regulator napięcia generatora AVR. Obecnie produkowane regulatory wzbudzenia są elektroniczne i poza regulacją napięcia generatora mają zadanie zabezpieczyć generator [2, M4] przed zbyt niską lub wysoką częstotliwością, przeciążeniami na wyjściu i_g , zbyt wysokim lub zbyt niskim napięciem wyjściowym, przekroczeniem wartości granicznych wzbudzenia napięcia u_f lub pradu *i_f*. Dodatkowo układ regulacji napięcia AVR może być wyposażony w dodatkowe wejście przeznaczone na sygnał z przekładnika prądowego Ict, który umożliwia pracę równoległą generatorów [2, M4]. Dodatkowe wejście od przekładnika umożliwia również zwiększenie napięcia na wyjściu generatora tak, aby kompensować spadki napięć na transformatorze lub w odbiorach oddalonych od generatora.

Schemat ogólny regulacji generatora synchronicznego pracującego autonomicznie przedstawia Rys. 3.2.1. Układ regulacji generatora synchronicznego składa się z regulatora wzbudzenia AVR, oraz z regulatora maszyny napędowej. Regulacja maszyny napędowej odpowiada za utrzymanie zadanej prędkości wału napędzającego generator. Regulator maszyny napędowej może regulować wartość prędkości wału ω_g lub wartość częstotliwości napięcia wyjściowego *f*. W przypadku generatora synchronicznego prędkość wału ω_g i częstotliwość napięcia wyjściowego *f* jest proporcjonalna i w stanie ustalonym można ją wyznaczyć, jako:

$$\omega_g = \frac{2\pi f}{p} \tag{3.2.1}$$

Gdzie *p* – liczba par biegunów generatora synchronicznego.

Do sterownika maszyny napędowej podawany jest sygnał zadanej wartości prędkości lub częstotliwości napięcia wyjściowego w zależności od zastosowanego regulatora.



Rys. 3.2.1 Schemat układu regulacji generatora synchronicznego pracującego autonomicznie.

Wykres wektorowy dla generatora synchronicznego pracującego autonomicznie podczas zmiany obciążenia przedstawiono na Rys. 3.2.2. W początkowej fazie generator nie jest obciążony i napięcie wyjściowe generatora u_{g0} jest równe napięciu indukowanemu w generatorze e_{g0} . Następnie następuje dołączenie obciążenia, co powoduje przepływ prądu i_{g1} . Prąd i_{g1} powoduje spadek napięcia na reaktancji generatora u_{Xg1} . W początkowej chwili prąd wzbudzenia nie zmienia się i napięcie indukowane nie zmienia swojej wartość. Jednak spadek napięcia u_{Xg1} powoduje zmniejszenie napięcia wyjściowego $u_{g1} < u_{g0}$, jak również przesunięcie fazowe między wektorami napięcia indukowanego i wyjściowego $\delta_{gl} > 0$. Następnie regulator napięcia generatora AVR zwiększa wartość prądu wzbudzenia zwiększając napięcie indukowane do wartości e_{g2} . Wartość napięcia indukowanego regulowana jest tak, aby napięcie wyjściowe było równe napięciu zadanemu $u_{g2} = u_{g0}$. W przypadku obciążenia o stałych parametrach zwiększenie napięcia wyjściowego generatora powoduje zwiększenie prądu obciążenia do wartości $i_{g2} > i_{g1}$. Dodatkowo, gdy dołączone jest obciążenie i_{g1} , które pobiera moc czynną powoduje to zmniejszenie prędkośći wirnika generatora. Nie jest to widoczne na wykresie wektorowym. Gdy prędkość jest mniejsza niż prędkość zadana regulator momentu maszyny napędowej powoduje zwiększenie momentu napędowego tak, aby zwiększyć prędkość wirnika. Podobnie dzieje się w chwili, gdy regulator napięcia zwiększa prąd wzbudzenia, co powoduje zwiększenie prądu obciążenia $i_{g1} > i_{g2}$.



Rys. 3.2.2 Wykres wektorowy dla generatora synchronicznego pracującego autonomicznie podczas zmiany obciążenia.

4. Układ wytwarzania energii elektrycznej - Synchrogenverter

4.1 Podstawowe założenia układu Synchrogenvertera

Generator synchroniczny stosowany jest, jako główne źródło energii elektrycznej czynnej jak i biernej. Moc bierna, generowana do sieci SEE lub do odbiorów jest niezbędna do poprawnego działania urządzeń np. silników indukcyjnych lub do zachowania stabilności napięcia i mocy systemu elektroenergetycznego. Generowanie mocy biernej w generatorze synchronicznym powoduje dodatkowe straty w uzwojeniach stojana jak i w uzwojeniach wirnika. Generator synchroniczny napędzany jest silnikiem spalinowym lub turbiną. Stałe czasowe silników spalinowych są rzędu sekund [3] a stałe czasowe układów elektrycznych jak wzbudzenia są rzędu ułamków sekund [2, M4]. Dłuższe stałe czasowe mechaniczne powodują większe zmiany częstotliwości oraz amplitudy napięcia wyjściowego.

Zmniejszenie strat w generatorze synchronicznym i poprawienie parametrów wyjściowych generatora synchronicznego możliwe jest poprzez zastosowanie dodatkowego przekształtnika energoelektronicznego. Przekształtniki energoelektroniczne charakteryzują się szybszą, niż generator synchroniczny, zmianę prądu wyjściowego, co umożliwia szybką odpowiedź układu na zmianę obciążenia. Układ generatora synchronicznego z przekształtnikiem nazwano Synchrogenverter [K3 - K8]. W dalszej części pracy połączenie generatora synchronicznego i przekształtnika z magazynem energii będzie nazywane Synchrogenverter. Układ ten został opatentowany i opisany w [K2], dodatkowo opatentowany jest układ połączenia samego przekształtnika z generatorem synchronicznym [K1]. Synchrogenverter składa się z generatora synchronicznego generującego moc czynną i równolegle dołączonego do jego wyjść przekształtnika generującego moc bierną i/lub moc czynna. W układzie Synchrogenvertera przekształtnik jest źródłem regulowanego prądu czynnego i biernego a generator jest źródłem napięcia wyjściowego. W pracy autonomicznej szybsze zmiany prądu przekształtnika dają możliwość zmniejszenia wpływu zmian obciążenia na zmianę parametrów wyjściowego napięcia. W stanach przejściowych lub w stanach większego zapotrzebowania obciążenia na moc bierną generator synchroniczny może również generować moc bierną.

Schemat blokowy układu Synchrogenvertera przedstawiono na Rys. 4.1.1. Blok układu regulacji ma za zadanie odpowiedni podział generowanej mocy między przekształtnikiem CV i generatorem synchronicznym GV tak, aby wyjściowe napięcie było równe napięciu zadanemu, lub aby wyjściowa moc była równa mocy zadanej. Regulację

pracy silnika napędowego DE, generatora synchronicznego GV, przekształtnika CV i magazynu energii BES zapewnia wspólny blok regulacji Synchrogenvertera. W pracy przyjęto oznaczenia generatora synchronicznego i przekształtnika pracujących w układzie Synchrogenvertera z indeksem V. W dalszej części pracy wszystkie wartości klasycznego generatora synchronicznego będą oznaczone indeksem "G" a generatora synchronicznego w układzie Synchrogenvertera z indeksem "GV". Przekształtnik CV ma dołączony do wyjścia napięcia stałego dwukierunkowy magazyn energii BES, który umożliwia dostarczenie lub pobór mocy czynnej, przez przekształtnik do wyjścia Synchrogenvertera. Do przekształtnika poza magazynem energii mogą być dołączone panele fotowoltaiczne, ogniwa paliwowe, i inne odnawialne źródła energii. W zależności od rodzaju źródła mocy odwodu DC możliwe jest: ciągłe dostarczanie mocy czynnej przez przekształtnik, poprawa parametrów napięcia wyjściowego lub powiększenie dostępnej mocy pozornej dostarczanej do obciążenia.



Rys. 4.1.1 Schemat blokowy układu wytwarzania energii elektrycznej zwanego Synchrogenverter.

W celu uproszczenia analizy oraz regulacji napięcia i mocy generowanej przez poszczególne elementy Synchrogenvertera zastosowany został układ współrzędnych xy. W tym układzie współrzędnych oś x wiruje zgodnie z wektorem napięcia wyjściowego generatora. Przykładowy wykres wektorowy we współrzędnych xy dla układu Synchrogenvertera przedstawiony jest na Rys. 4.1.2.



Rys. 4.1.2 Rozpływ prądów i napięć w układzie Synchrogenvertera we współrzędnych xy.

W układzie współrzędnych xy napięcie wyjściowe ma tylko składową w osi x, u_{GVx} równą amplitudzie napięcia wyjściowego.

$$\boldsymbol{u}_{GV} = \boldsymbol{u}_{GVx} \tag{4.1.1}$$

Wyjście generatora synchronicznego jest połączone równolegle z przekształtnikiem, zatem prąd wyjściowy Synchrogenvertera, czyli prąd obciążenia $i_{Lo} = i_{Lox} + ji_{Loy}$ jest równy sumie prądów generatora i przekształtnika

$$\mathbf{i}_{SGV} = \mathbf{i}_{Lo} = \mathbf{i}_{GV} + \mathbf{i}_{CV} = (i_{GVx} + ji_{GVy}) + (i_{CVx} + ji_{CVy})$$
(4.1.2)

Rozpisując równanie (4.1.2) na równania współrzędnych w osiach x i y:

$$i_{SGVx} = i_{Lox} = i_{GVx} + i_{CVx}$$
 (4.1.3)

$$i_{SGVy} = i_{Loy} = i_{GVy} + i_{CVy}$$
 (4.1.4)

Korzystając ze wzorów na chwilowe wartości mocy zgodnie z [A1, A2, P6] chwilowa moc wyjściowa Synchrogenvertera S_{SGV} w układzie współrzędnych *xy* jest równa mocy obciążenia S_{Lo} .

$$S_{SGV} = S_{Lo} = \boldsymbol{u}_{GV} \boldsymbol{i}_{SGV}^{*} = u_{GVx} (i_{SGVx} - j i_{SGVy})$$
(4.1.5)
= $u_{GVx} i_{SGVx} - j u_{GVx} i_{SGVy}$

Gdzie wartość \mathbf{i}_{SGV}^* oznacza wektor sprzężony do wektora prądu Synchrogenvertera \mathbf{i}_{SGV} .

Teoria mocy chwilowych przedstawiona w [A1, A2] nie w odpowiada tradycyjnej mocy czynnej i biernej, co jest opisane w [P6]. Jednakże w pracy przyjęto układ trójfazowy symetryczny co umożliwia stosowanie powyższej teorii mocy czynnej i biernej. W pracy w stanie ustalonym przyjęto moc czynną chwilową jako moc czynną, a moc bierną chwilową jako moc bierną.

Moc czynna jest wartością rzeczywistą mocy pozornej a moc bierna częścią urojoną mocy pozornej, zatem można zapisać wzory na moce generowane do obciążenia, w stanie ustalonym, przez układ Synchrogenvertera.

$$P_{SGV} = Re(S_{SGV}) = u_{GVx}i_{SGVx}$$

$$(4.1.6)$$

$$Q_{SGV} = Re(S_{SGV}) = -u_{GVx}i_{SGVy} \tag{4.1.7}$$

Przy czym dodatnia moc bierna jest mocą bierna indukcyjną dostarczaną do obciążenia a ujemna moc bierna jest mocą bierną pojemnościową dostarczaną do obciążenia. Współrzędne xy są też nazywane: oś x osią aktywną (czynną), oś y osią reaktywną (bierną) [L4]. Ze wzorów (4.1.6) i (4.1.7) wynika, że prąd w osi x odpowiada za moc czynną układu a prąd w osi y za moc bierną. Nie jest to zależne od pracy na SEE lub pracy autonomicznej o ile oś x jest zgodna z napięciem wyjściowym układu Synchrogenvertera.

Podobnie można napisać wzory na moce generatora synchronicznego i przekształtnika.

$$P_{GV} = u_{GVx} i_{GVx} \tag{4.1.8}$$

$$Q_{GV} = -u_{GVx}i_{GVy} \tag{4.1.9}$$

$$P_{CV} = u_{GVx} i_{CVx} \tag{4.1.10}$$

$$Q_{CV} = -u_{GVx}i_{CVy} \tag{4.1.11}$$

Zastosowanie układu współrzędnych *xy* upraszcza zatem wzory na moce jak i umożliwia pośrednią regulację mocy czynnych i biernych poprzez regulację prądu w osi *x* lub osi *y*.

4.2 Znamionowa moc układu Synchrogenvertera

Generator synchroniczny ma określoną wyjściową pozorną moc znamionową S_{GN} . Klasyczny generator synchroniczny umożliwia dostarczenie maksymalnej długotrwałej mocy pozornej do obciążenia bądź sieci elektroenergetycznej równej mocy znamionowej generatora synchronicznego:

$$S_{Lo} = S_{GN} \tag{4.2.1}$$

Jest to wartość mocy pozornej możliwej do generowania przez generator synchroniczny. Możliwa jest generacja krótkotrwałej mocy większej od mocy znamionowej jednak nie jest możliwa generacja mocy długotrwale, z powodów grzania się elementów generatora. Moc czynna znamionowa podawana jest dla znamionowego współczynnika mocy równego $\cos(\varphi_{GN})=0.8$. Współczynnik mocy $\cos(\varphi_{GN})$ określa wartość znamionowej mocy czynnej P_{GN} i znamionowej mocy biernej Q_{GN} , jako:

$$P_{GN} = S_{GN} \cos(\varphi_{GN}) = 0.8S_{GN}$$
(4.2.2)

$$Q_{GN} = S_{GN} \sin(\varphi_{GN}) = 0.6S_{GN}$$
(4.2.3)

Przypadek, w którym generator synchroniczny dostarcza znamionową moc czynną i bierną, przedstawia Rys. 4.2.1. Cała moc dostarczana przez generator jest pobierana przez obciążenie. Wszystkie zmiany obciążenia jak i stany awaryjne działają bezpośrednio na generator.



Rys. 4.2.1 Rozpływ znamionowych mocy klasycznego generatora synchronicznego zasilającego obciążenie lub sieć elektroenergetyczną SEE.

Zastosowanie przekształtnika, jako dodatkowego źródła mocy w układzie Synchrogenvertera pozwala na generację dodatkowej mocy do obciążenia [K1 - K8]. Dostarczanie dodatkowej mocy czynnej i/lub biernej umożliwia generację większej mocy pozornej do obciążenia. Rozpływ mocy w układzie Synchrogenvertera przedstawiono na Rys. 4.2.2. Przyjęto oznaczenie "V" dla wartości opisujących urządzenia pracujące w układzie Synchrogenvertera.

W układzie z Rys. 4.2.2 generator synchroniczny generuje moc czynną P_{GV} i bierną Q_{GV} :

$$S_{GV} = P_{GV} + jQ_{GV} \tag{4.2.4}$$

Przekształtnik energoelektroniczny generuje moc czynną P_{CV} i bierną Q_{CV} :

$$S_{CV} = P_{CV} + jQ_{CV}$$
 (4.2.5)



Synchrogenverter

Rys. 4.2.2 Rozpływ mocy w układzie Synchrogenvertera.

W układzie Synchrogenvertera generator synchroniczny połączony jest równolegle z przekształtnikiem, zatem wyjściowa moc pozorna Synchrogenvertera S_{SGV} , czyli moc generowana do obciążenia S_{Lo} , jest równa sumie generowanych mocy generatora S_{GV} i przekształtnika S_{CV} .

$$S_{SGV} = S_{Lo} = P_{SGV} + jQ_{SGV} = S_{GV} + S_{CV} = P_{GV} + jQ_{GV} + P_{CV} + jQ_{CV} = (4.2.6)$$
$$(P_{GV} + P_{CV}) + j(Q_{GV} + Q_{CV})$$

Moc pozorną Synchrogenvertera można rozbić na dwa człony moc czynną P_{SGV} i bierną Q_{SGV} :

$$P_{SGV} = P_{GV} + P_{CV} \tag{4.2.7}$$

$$Q_{SGV} = Q_{GV} + Q_{CV} \tag{4.2.8}$$

Moc czynna znamionowa układu Synchrogenvertera jest równa sumie mocy czynnej generatora synchronicznego P_{GV} i mocy czynnej dostarczanej z magazynu energii P_{CV} . Jako że w układzie Synchrogenvertera generator synchroniczny generuje tylko moc czynną możliwe jest zwiększenie generowanej mocy czynnej przy zachowaniu prądu wyjściowego generatora równego prądowi znamionowemu I_{GN} . Prąd znamionowy generatora I_{GN} odpowiada generowaniu, przy znamionowym napięciu fazowym generatora U_{GN} , mocy równej mocy znamionowej pozornej $S_{GV} = 3U_{GN}I_{GN}$. Zatem znamionowa moc czynna generowana przez generator synchroniczny w układzie Synchrogenvertera P_{GVN} jest równa znamionowej mocy pozornej generatora klasycznego S_{GN} .

$$P_{GVN} = S_{GN} = (1/0.8)P_{GN} = 1.25P_{GN}$$
(4.2.9)

Moc czynną dostarczaną przez przekształtnik można wyrazić, jako pewną krotność mocy znamionowej generatora synchronicznego:

$$P_{CVN} = k_{BES} P_{GN} \tag{4.2.10}$$

Gdzie $k_{BES} = \frac{P_{CVN}}{P_{GN}}$ – współczynnik krotności mocy długotrwałej dostarczanej z magazynu energii lub źródła energii P_{CVN} do mocy znamionowej generatora synchronicznego P_{GN} .

Współczynnik k_{BES} powinien być mniejszy od jedności, ponieważ generator synchroniczny jest uważany za główne źródło napięcia. Możliwe jest zwiększenie współczynnika do wartości $k_{BES} \approx 1$ lub powyżej lecz należy wtedy zmienić formę sterowania generatora synchronicznego i przekształtnika. W przypadku, gdy $k_{BES} \ge 1$ regulacja generatora powinna odbywać się jak w przypadku współpracy z siecią SEE, natomiast przekształtnik powinien być regulowany jak w przypadku pracy autonomicznej.

Uwzględniając wzory (4.2.9) i (4.2.10) we wzorze (4.2.7) znamionowa moc czynna Synchrogenvertera jest równa

$$P_{SGVN} = P_{GVN} + P_{CVN} = 1.25P_{GN} + k_{BES}P_{GN} = (1.25 + k_{BES})P_{GN}$$
(4.2.11)

Zatem możliwe jest zwiększenie mocy czynnej generatora o 25% jak i dostarczanie mocy czynnej P_{CVN} z magazynu energii, co powiększa moc znamionową Synchrogenvertera. Współczynnik $k_{BES} = 0$ odpowiada przypadkowi, gdy magazyn energii umożliwia dostarczenie tylko krótkotrwałej mocy czynnej na stany przejściowe lub nie ma magazynu energii. Z powyższego przykładu, gdy $k_{BES} = 0$ można zauważyć, że stosując układ Synchrogenvertera zamiast klasycznego generatora synchronicznego można zwiększyć moc czynną wyjściową o 25% w porównaniu do klasycznego generatora.

Do obciążenia musi zostać dostarczona moc bierna. W przypadku klasycznego generatora moc bierna wyrażona jest wzorem (4.2.3). Znamionowa moc bierna Synchrogenvertera podobnie jak moc czynna jest sumą mocy biernej generatora synchronicznego i przekształtnika CV zgodnie ze wzorem (4.2.8). Generator synchroniczny w układzie Synchrogenvertera generuje tylko moc czynną, zatem znamionowa moc bierna generatora synchronicznego w stanie ustalonym w jest równa zero:

$$Q_{GVN} = 0 \tag{4.2.12}$$

Znamionową moc bierną Synchrogenvertera można podzielić na dwa przypadki:

- a) dostarczanie mocy biernej przez Synchrogenverter równej znamionowej mocy biernej klasycznego generatora synchronicznego (opisane w rozdziale 4.2.1),
- b) zachowanie znamionowego współczynnika mocy $\cos(\varphi_{GN})$ dla prądu wyjściowego Synchrogenvertera (opisane w rozdziale 4.2.2).

4.2.1 Znamionowa moc układu Synchrogenvertera w przypadku zachowania stałej mocy biernej Q_{GN}

W tym przypadku Synchrogenverter generuje moc bierną równą znamionowej mocy biernej klasycznego generatora synchronicznego. Jako że generator nie generuje mocy biernej całą moc bierną dostarcza przekształtnik. W tym przypadku moce zapisane są z indeksem "*a*".

$$Q_{SGVN_a} = Q_{CVN_a} = Q_{GN} = 0.6 S_{GN}$$
(4.2.13)

Znając znamionowe moce czynne (4.2.11) i bierne (4.2.13) można wyznaczyć moc pozorną generowaną na wyjściu Synchrogenvertera, jako

$$S_{SGVN_a} = \sqrt{P_{SGVN}^2 + Q_{SGVN_a}^2} = \sqrt{(1.25 + k_{BES})^2 \cdot P_{GN}^2 + Q_{GN}^2}$$

$$= \sqrt{(1.25 + k_{BES})^2 0.8^2 S_{GN}^2 + 0.6^2 S_{GN}^2}$$

$$= S_{GN} \sqrt{(1.25 + k_{BES})^2 0.64 + 0.36}$$

$$(4.2.14)$$

Wartość pod pierwiastkiem będzie zawsze większa niż jeden niezależnie od współczynnika k_{BES} . Moc pozorna układu Synchrogenvertera jest, zatem większa niż moc pozorna klasycznego generatora synchronicznego $S_{SGVN} > S_{GN}$.

W celu dostarczenia mocy pozornej jak we wzorze (4.2.14) niezbędne jest zastosowanie przekształtnika o odpowiedniej mocy znamionowej. Moc znamionowa przekształtnika jest wyznaczana z mocy czynnej i biernej przekształtnika, jako

$$S_{CVN_a} = \sqrt{P_{CVN}^{2} + Q_{CVN}^{2}} = \sqrt{k_{BES}^{2} P_{GN}^{2} + Q_{GN}^{2}}$$

$$= \sqrt{k_{BES}^{2} 0.8^{2} S_{GN}^{2} + 0.6^{2} S_{GN}^{2}} = S_{GN} \sqrt{0.64 \cdot k_{BES}^{2} + 0.36}$$
(4.2.15)

Wartości mocy poszczególnych elementów układu Synchrogenvertera dla przykładowych wartości współczynnika k_{BES} podano w tabeli 4.2.1.

Z tabeli wynika, że przy zatasowaniu samego przekształtnika bez magazynu energii, przypadek $k_{BES} = 0$, możliwe jest zwiększenie mocy czynnej o 25% przy zastosowaniu
przekształtnika o mocy równej 60% mocy pozornej znamionowej generatora klasycznego. Natomiast przy zastosowaniu przekształtnika o mocy ok. 72% mocy pozornej generatora, przypadek dla $k_{BES} = 0.5$, możliwe jest zwiększenie generowanej mocy czynnej o 75% względem samego generatora synchronicznego.

Tabela 4.2.1. Wartości mocy dla przypadku, gdy Synchrogenverter generuje moc bierną równą mocy znamionowej generatora synchronicznego.

	Moce generatora synchronicznego w układzie Synchrogenvertera			Moce znamionowe przekształtnika w układzie Synchrogenvertera			Moce znamionowe Synchrogenvertera		
<i>k</i> _{BES}	P_{GVN}	Q_{GVN}	S_{GVN}	P_{CVN}	Q_{CVN_a}	S_{CVN_a}	P_{SGVN}	Q _{SGVN_a}	S _{SGVN_a}
1.00	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$1.0P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$2.25P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$1.90S_{GN}$
0.50	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$0.5P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$0.72S_{GN}$	$1.75P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$1.52S_{GN}$
0.35	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$0.35P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$0.66S_{GN}$	$1.60P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$1.41S_{GN}$
0.00	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$0.0P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$0.6S_{GN}$	$1.25P_{GN}$	$1.0Q_{GN}$	$1.17S_{GN}$

4.2.2 Znamionowa moc układu Synchrogenvertera w przypadku zachowania stałego współczynnika mocy $\cos(\varphi_{GN})$

W tym przypadku zachowany jest współczynnik mocy na wyjściu Synchrogenvertera równy współczynnikowi znamionowemu generatora synchronicznego, $\cos(\varphi_{GN}) = \cos(\varphi_{SGVN})$ = 0.8. Oznacza to stały stosunek mocy czynnej do biernej. Jeśli moc czynna wyraża się wzorem (4.2.11) to moc bierna musi mieć taki sam współczynnik. W tym przypadku moce zapisane są z indeksem "*b*".

$$Q_{SGVN_b} = Q_{CVN_b} = (1.25 + k_{BES}) Q_{GN}$$
(4.2.16)

W tym przypadku możliwe jest zwiększenie mocy czynnej generatora o 25% jak i dostarczanie mocy czynnej P_{CVN} z magazynu energii. Wartość mocy czynnej Synchrogenvertera wyraża się wzorami (4.2.10) i (4.2.11). Uwzględniając moc czynną i bierną można napisać równanie mocy pozornej generowanej przez układ Synchrogenvertera

$$S_{SGVN_b} = \sqrt{P_{SGVN}^2 + Q_{SGVN_b}^2} = (1.25 + k_{BES})\sqrt{P_{GN}^2 + Q_{GN}^2}$$

$$= (1.25 + k_{BES})S_{GN}$$
(4.2.17)

Oznacza to, że przy zachowaniu stałego współczynnika mocy równego 0.8 wyjściowa moc znamionowa Synchrogenvertera może być większa od mocy klasycznego generatora o współczynnik (1.25 + k_{BES}).

Podobnie jak w przypadku z rozdziału 4.2.1 niezbędne jest dostarczenie odpowiedniej mocy przez przekształtnik. Moc znamionową przekształtnika można wyznaczyć z mocy czynnej (4.2.10) i biernej przekształtnika (4.2.16) jako

$$S_{CVN_b} = \sqrt{P_{CVN}^{2} + Q_{CVN_b}^{2}} = \sqrt{k_{BES}^{2} P_{GN}^{2} + (1.25 + k_{BES})^{2} Q_{GN}^{2}}$$

$$= \sqrt{k_{BES}^{2} 0.8^{2} S_{GN}^{2} + (1.25 + k_{BES})^{2} 0.6^{2} S_{GN}^{2}}$$

$$= S_{GN} \sqrt{k_{BES}^{2} 0.64 + (1.25 + k_{BES})^{2} 0.36}$$
(4.2.18)

Przykładowe wartości współczynnika k_{BES} i odpowiadające im moce poszczególnych urządzeń przedstawiono w tabeli 4.2.2. W celu zachowania stałego współczynnika cos opniezbędne jest zwiększenie generowanej mocy biernej. Jako, że moc bierną dostarcza przekształtnik moc pozorna przekształtnika jest większa niż w przypadku z rozdziału 4.2.1. Moc czynna znamionowa jest równa mocy z przypadku z rozdziału 4.2.1. Z tabeli wynika, że dla przekształtnika bez magazynu energii, $k_{BES} = 0$, możliwe jest zwiększenie znamionowej mocy czynnej i biernej o 25% w porównaniu z klasycznym generatorem. Przy zastosowaniu magazynu energii o mocy równej $35\% P_{GN}$, $k_{BES} = 0.35$, oraz przy zastosowaniu przekształtnika o mocy znamionowej równej mocy generatora synchronicznego, wyjściowa moc znamionową układu Synchrogenvertera zwiększa się o 60% w stosunku do znamionowej mocy pozornej generatora synchronicznego.

Tabela 4.2.2. Wartości mocy dla przypadku, gdy Synchrogenverter zachowuje stały współczynnik mocy $\cos\varphi_{SGVN} = \cos\varphi_{GN}$.

	Moce generatora synchronicznego w układzie Synchrogenvertera			Moce znamionowe przekształtnika w układzie Synchrogenvertera			Moce znamionowe Synchrogenvertera		
<i>k</i> _{BES}	P_{GVN}	Q_{GVN}	S_{GVN}	P_{CVN}	Q_{CVN_b}	S_{CVN_b}	P_{SGVN}	Q_{SGVN_b}	S _{SGVN_b}
1.00	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$1.0P_{GN}$	$2.25Q_{GN}$	$1.57S_{GN}$	$2.25P_{GN}$	$2.25Q_{GN}$	$2.25S_{GN}$
0.50	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$0.5P_{GN}$	$1.75Q_{GN}$	$1.12S_{GN}$	$1.75P_{GN}$	$1.75Q_{GN}$	$1.75S_{GN}$
0.35	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$0.35P_{GN}$	$1.60Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$1.60P_{GN}$	$1.60Q_{GN}$	$1.60S_{GN}$
0.00	$1.25P_{GN}$	$0.0Q_{GN}$	$1.0S_{GN}$	$0.0P_{GN}$	$1.25Q_{GN}$	$0.75S_{GN}$	$1.25P_{GN}$	$1.25Q_{GN}$	$1.25S_{GN}$

4.3 Wyznaczenie strat w układzie Synchrogenvertera

Synchrogenvertera składa się z generatora synchronicznego i przekształtnika. Straty mocy występują w generatorze i przekształtniku. W generatorze występują straty mechaniczne i straty elektryczne. Straty mechaniczne można podzielić na straty w łożyskach i straty wentylacyjne, które przy stałej prędkości są stałe niezależnie od mocy generowanej. W generatorze synchronicznym elektryczne straty mocy występują w żelazie, w uzwojeniach stojana oraz w uzwojeniu wzbudzenia. Wyznaczenie strat występujących w generatorze synchronicznym jest opisane w literaturze [L4, M4, P5]. Straty w przekształtniku dzielą się na straty na przewodzenie i przełączanie oraz straty w filtrze wyjściowym. W pracy przedstawiono szczegółową analizę strat mocy w generatorze w celu uwidocznienia różnic w stratach między klasycznym generatorem a generatorem pracującym w układzie Synchrogenvertera. W tym rozdziale przedstawione są obliczenia dla generatora o wartościach przedstawionych w [4] oraz w tabeli A.1.1. Różnice w stratach wyznaczone są dla generacji na wyjściu mocy czynnej i biernej równej odpowiednio mocy czynnej znamionowej P_{GN} i mocy biernej znamionowej generatora Q_{GN} .

4.3.1 Wyznaczenie strat w generatorze synchronicznym

W generatorze synchronicznym uzwojenie wzbudzenia wytwarza pole magnetyczne, które podczas obracania się wirnika powoduje zmienne pole magnetyczne. Zmienne pole magnetyczne powoduje indukowanie się napięcia w stojanie generatora, które jest pożądane jednak również powoduje powstawanie strat w żelazie. Zmienne pole magnetyczne proporcjonalne jest do indukowanego napięcia w generatorze [L4, P5]. Przy założeniu stałej częstotliwości można zapisać wzór na straty mocy w żelazie P_{Fe} , jako:

$$P_{Fe} = c_{Fe} E_f^{\ 2} \tag{4.3.1}$$

Gdzie: E_f – amplituda indukowanego napięcia w generatorze synchronicznym, c_{Fe} – współczynnik strat mocy w żelazie.

W układzie Synchrogenvertera generator synchroniczny generuje tylko moc czynną, zatem zmniejszone jest napięcie indukowane E_{f} . Mniejsze napięcie indukowane generatora w układzie Synchrogenvertera powoduje mniejsze straty w żelazie niż w przypadku klasycznego generatora synchronicznego.

Do określenia strat w żelazie generatora synchronicznego należy wyznaczyć amplitudę napięcia indukowanego E_{f} . Wartość napięcia można wyliczyć metodą podaną w rozdziale 2.1. Wyznaczając podaną metodą napięcie indukowane dla generatora o

parametrach podanych w tabeli A.1.1 możliwe jest porównanie strat. Do wyznaczenia strat w żelazie niezbędny jest współczynnik c_{Fe} , którego nie podaje producent. Możliwe jest jednak określenie procentowego zmniejszenia poszczególnych strat w stosunku do klasycznego generatora synchronicznego.

$$\delta P_{Fe} = \frac{P_{Fe}(P_{GN}, Q_{GN}) - P_{Fe}(P_{GN}, 0)}{P_{Fe}(P_{GN}, Q_{GN})} * 100\%$$
(4.3.2)

Gdzie: $P_{Fe}(P_{GN}, Q_{GN})$ – moc strat w żelazie w generatorze synchronicznym generującym moc czynną znamionową i moc bierną znamionową, $P_{Fe}(P_{GN}, \theta)$ – moc strat w żelazie w generatorze synchronicznym generującym jedynie moc czynną znamionową.

Klasyczny generator generuje moc czynną i bierną równą mocy znamionowej, w układzie Synchrogenvertera natomiast generator synchroniczny generuje tylko moc czynną równą znamionowej. Podstawiając odpowiednie wartości mocy czynnych i biernych do równań z rozdziału 2.1 otrzymano dla generatora klasycznego $E_f(P_{GN}, Q_{GN}) = 786$ V oraz dla generatora pracującego w układzie Synchrogenvertera $E_f(P_{GN}, 0) = 551$ V. W efekcie możliwe jest wyznaczenie procentowego spadku strat w żelazie w generatorze, jako

$$\delta P_{Fe} = \frac{P_{Fe}(P_{GN}, Q_{GN}) - P_{Fe}(P_{GN}, 0)}{P_{Fe}(P_{GN}, Q_{GN})} * 100\% = 50,8\%$$
(4.3.3)

Współczynnik δP_{Fe} określa procentowe zmniejszenie strat w żelazie w porównaniu z mocą strat w żelazie w klasycznym generatorze synchronicznym.

Straty w stojanie generatora synchronicznego zależą od prądu wyjściowego i od rezystancji uzwojeń stojana R_s . Przy założeniu stałej rezystancji uzwojeń stojana R_s można zapisać wzór na moc strat w miedzi stojana generatora synchronicznego.

$$P_{Cu_{Stator}} = i_{Gx}^{2} R_{S} + i_{Gy}^{2} R_{S}$$
(4.3.4)

Przyjmując w stanie ustalonym symetryczne obciążenie trójfazowe oraz uwzględniając (4.1.6) i (4.1.7) można zapisać moc strat w miedzi stojana w zależności od generowanej mocy czynnej i biernej.

$$P_{Cu_Stator}(P_{GN}, Q_{GN}) = \left(\frac{P_{GN}}{u_{Gx}}\right)^2 R_S + \left(\frac{Q_{GN}}{-u_{Gx}}\right)^2 R_S = \left(\frac{S_{GN}}{u_{Gx}}\right)^2 R_S$$
(4.3.5)

Generator synchroniczny pracujący w układzie Synchrogenvertera generuje tylko moc czynną, która jest równa mocy znamionowej. W układzie Synchrogenvertera generator generuje tylko moc czynną, zatem straty w miedzi stojana można wyznaczyć, jako:

$$P_{Cu_Stator}(P_{GN}, 0) = \left(\frac{P_{GN}}{u_{Gx}}\right)^2 R_S + \left(\frac{0}{u_{Gx}}\right)^2 R_S = \left(\frac{P_{GN}}{u_{Gx}}\right)^2 R_S$$
(4.3.6)

Można wyznaczyć podobnie jak straty w żelazie współczynnik spadku strat w miedzi stajana w procentach:

$$\delta P_{Cu_Stator} = \frac{P_{Cu_Stator}(P_{GN}, Q_{GN}) - P_{Cu_Stator}(P_{GN}, 0)}{P_{Cu_Stator}(P_{GN}, Q_{GN})} * 100\% = 36\%$$
(4.3.7)

Współczynnik δP_{Cu_Stator} określa zmniejszenie o 36% strat w miedzi stojana generatora w układzie Synchrogenvertera w porównaniu z klasycznym generatorem.

Odwód wzbudzenia posiada rezystancję przewodów wzbudzenia, przez którą przepływa, w stanie ustalonym prąd stały *i*_f. Przepływ prądu powoduje straty w miedzi uzwojenia wzbudzenia

$$P_f = i_f^2 R_f \tag{4.3.8}$$

Do wyznaczenia strat we wzbudzeniu należy wyznaczyć prąd wzbudzenia. Prąd wzbudzenia wytwarza pole magnetyczne, które podczas ruchu wirnika indukuje napięcie w stojanie generatora. Wyznaczenie prądu wzbudzenia możliwe jest przy uwzględnieniu wzoru (2.1.32). W stanie ustalonym prędkość wirnika jest stała. Przy założeniu stałej indukcyjności wzajemnej M_{df} można napisać wzór na napięcie indukowane, jako

$$i_f = \frac{E_f}{c_f} \tag{4.3.9}$$

Gdzie: $c_f = \omega_g M_{df}$.

W celu wyznaczenia strat we wzbudzeniu można wyznaczyć kwadrat prądu wzbudzenia.

$$i_f^{\ 2} = \frac{E_f^{\ 2}}{c_f^{\ 2}} \tag{4.3.10}$$

Wartość kwadratu napięcia indukowanego została wyznaczona podczas wyznaczania strat w żelazie. W efekcie możliwe jest wyznaczenie procentowego spadku strat we wzbudzeniu generatora, jako

$$\delta P_f = \frac{P_f(P_{GN}, Q_{GN}) - P_f(P_{GN}, 0)}{P_f(P_{GN}, Q_{GN})} * 100\% = 50,8\%$$
(4.3.11)

Podobnie jak w przypadku strat w żelazie straty w miedzi wzbudzenia zmniejszają się o ok. 50% w porównaniu do klasycznego generatora.

W celu porównania z klasycznym generatorem synchronicznym zmniejszenie strat wyznaczono dla przypadku generowania do obciążenia znamionowej mocy czynnej P_{GN} i znamionowej mocy biernej Q_{GN} generatora synchronicznego. W przypadku Synchrogenvertera generator generuje jedynie moc czynną P_{GN} , a przekształtnik dostarcza moc bierną $Q_{CV} = Q_{GN}$. Również założono symetryczne trójfazowe obciążenie, które wymusza prąd sinusoidalny. Należy podkreślić, iż zastosowanie przekształtnika może spowodować dodatkowe wyższe harmoniczne prądu obciążenia, które mogą zwiększyć straty w generatorze. Wyznaczone wartości odpowiadają procentowemu zmniejszeniu strat w przypadku pracy generatora w układzie Synchrogenvertera.

W celu dokładnego wyznaczenia strat w generatorze synchronicznym można posłużyć się wykresami producenta [4]. Posługując się wykresem sprawności jak na Rys. 4.3.1 można oszacować ogólne straty P_{loss_all} generatora w zależności od mocy wyjściowej i kąta obciążenia.

$$P_{loss_all} = 1 - \eta_G \tag{4.3.12}$$

97 96.5 1 96 2 95.5 sprawność η_G [%] 95 94.5 $\cos(\phi)=0.8$ A 94 $\cos(\phi)=0.9$ 93.5 $\cos(\phi)=1$ 93 0.2 0.7 0.3 0.4 0.5 0.6 0.8 0.9 1 1.1 $S_G[pu]$

Gdzie: η_G - sprawność generatora synchronicznego.

Rys. 4.3.1 Zależność sprawności generatora synchronicznego od generowanej mocy pozornej.

Z Rys. 4.3.1 można wyznaczyć sprawność generatora η_G w punkcie "0", który odpowiada generowanej mocy czynnej znamionowej i biernej znamionowej. Punkt "1" odpowiada generowanej mocy czynnej znamionowej przy zerowej mocy biernej, a punkt 2 odpowiada generowanej mocy czynnej równej mocy znamionowej generatora synchronicznego, przy zerowej mocy biernej. Sprawność generatora w poszczególnych punktach wyznaczone z Rys. 4.3.1:

$$\eta_{g_0}(P_{GN}, Q_{GN}) = 94,34\% \tag{4.3.13}$$

$$\eta_{g_{\perp}1}(P_{GN},0) = 96,1\% \tag{4.3.14}$$

$$\eta_{g_2}(P_G = S_{GN}, 0) = 95,55\% \tag{4.3.15}$$

Zatem jeśli w układzie Synchrogenvertera generator synchroniczny nie generuje mocy biernej, przejście z punktu "0" do "1" powiększa sprawność o ok. 1,7%. Z rysunku

wynika również, że zwiększając moc czynną generowaną przez generator o 25% (punkt "2") sprawność rośnie o ok. 1,2%. Odpowiada to przypadkowi, w którym Synchrogenverter generuje większą moc pozorną niż znamionowa moc pozorna generatora $P_{GVN} = 1.25P_{GN}$.

4.3.2 Wyznaczenie sprawności przekształtnika

Straty mocy w przekształtniku zależą od częstotliwości przełączeń, zastosowanych tranzystorów, metod modulacji [C3]. Wyznaczenie strat polega na wyliczeniu strat na przełączanie oraz strat na przewodzenie. Na wyjściu przekształtnika znajduje się filtr L, LC, transformator itd. Zatem w filtrze występują również straty mocy, które należy uwzględnić w stratach przekształtnika.

Chcąc zastąpić generator synchroniczny układem Synchrogenvertera możliwe jest wyznaczenie sprawności przekształtnika, przy której straty przekształtnika będą równe różnicy sprawności generatora klasycznego $\eta_G(P_{GN}, Q_{GN})$ i generatora w układzie Synchrogenvertera $\eta_{GV}(P_{GN}, 0)$. Zastosowanie układu Synchrogenvertera w przypadku z Rys. 4.3.1 zmniejsza straty w generatorze o wartość

$$\Delta P_{GV_loss} = (\eta_G(P_{GN}, Q_{GN}) - \eta_{GV}(P_{GN}, 0)) S_{GN}$$
(4.3.16)

W przypadku wyznaczenia strat przyjęto równą moc wyjściową generatora klasycznego i układu Synchrogenvertera $S_{SGV} = S_{GN}$. Generator generuje moc czynną, czyli przekształtnik musi dostarczyć moc bierną przy współczynniku cos φ =0.8 moc bierna dostarczana przez przekształtnik jest równa

$$S_{CV} = Q_{CV} = 0.6S_{GN} \tag{4.3.17}$$

Można wyznaczyć straty w przekształtniku podobnie jak straty w generatorze:

$$P_{CV_loss} = (1 - \eta_{CV})S_{CV} = (1 - \eta_{CV})0.6S_{GN}$$
(4.3.18)

Zatem przyrównując straty w przekształtniku do zmniejszenia strat w generatorze, czyli $\Delta P_{GV \ loss} = P_{CV \ loss}$, można wyznaczyć sprawność przekształtnika, jako

$$\eta_{CV} = 1 - \frac{\left(\eta_G(P_{GN}, Q_{GN}) - \eta_{GV}(P_{GN}, 0)\right)S_{GN}}{0.6S_{GN}} = 0.97$$
(4.3.19)

Dla generatora o mocy pozornej znamionowej $S_{GN} = 500$ kVA analizowanego w pracy, aby straty się nie zwiększyły przy zastosowaniu układu Synchrogenvertera niezbędny jest przekształtnik o mocy $S_{CV} = 0.6S_{GN} = 300$ kVA i sprawności $\eta_{CV} = 97\%$. Przekształtniki o takich sprawnościach można znaleźć w literaturze [L2], również prowadzone są badania nad przekształtnikami o wysokiej sprawności [R1].

Zadaniem głównym układu Synchrogenvertera nie jest zwiększenie sprawności całego układu, zatem nie jest konieczne stosowanie przekształtnika o wysokiej sprawności. Jednak poprzez zastosowanie przekształtnika o sprawności niższej niż wyliczona ze wzoru (4.3.19) możliwe jest zachowanie strat na stałym poziomie przy zwiększeniu mocy pozornej wyjściowej układu. Możliwe jest, zatem powiększenie dostępnej mocy bez konieczności wymiany generatora synchronicznego. Również straty w generatorze synchronicznym występują w uzwojeniach jak i w żelazie, co w zwartej obudowie utrudnia chłodzenie części generatora [G1, K10, K11]. Zastosowanie Synchrogenvertera powoduje przeniesienie części strat z wirnika i z uzwojeń do przekształtnika, który można chłodzić w prostszy sposób stosując np. radiatory z wentylatorami.

5. Praca autonomiczna układu Synchrogenvertera

5.1 Metoda regulacji układu Synchrogenvertera pracującego autonomicznie

W pracy autonomicznej generator synchroniczny generuje moc czynną taką, przy której moment mechaniczny jest równy momentowi elektromagnetycznemu wytworzonemu w tworniku, oraz taki prąd wzbudzenia, aby napięcie na wyjściu generatora było równe wartości zadanej. W układzie Synchrogenvertera w pracy autonomicznej niezbędne jest dostarczenie odpowiedniej mocy czynnej i biernej w celu utrzymania stałego napięcia zasilania odbiorów jak i prędkości wału generatora. Każda zmiana mocy czynnej powoduje zmianę momentu elektromagnetycznego hamującego wirnik, co powoduje zmianę prędkości. Zmiana mocy biernej powoduje zmianę napięcia wyjściowego. Niezbędne jest, aby układ regulacji zapewniał szybką odpowiedź na zmianę obciążenia oraz zapewniał jak najmniejszą zmianę parametrów napięcia wyjściowego.

Prąd wyjściowy Synchrogenvertera, czyli prąd obciążenia, jest równy sumie prądów generatora i przekształtnika.

$$i_{SGV} = i_{Lo} = i_{GV} + i_{CV}$$
 (5.1.1)

Powyższe równanie można zapisać, jako poszczególne składowe prądu:

$$i_{SGVx} = i_{Lox} = i_{GVx} + i_{CVx}$$
 (5.1.2)

$$i_{SGVy} = i_{Loy} = i_{GVy} + i_{CVy}$$
 (5.1.3)

Równoległe połączenie generatora synchronicznego i przekształtnika, który jest regulowanym źródłem prądu, daje możliwość kontrolowania rozpływu prądu czynnego i biernego między generatorem i przekształtnikiem. Zgodnie ze wzorem (4.1.6) i (4.1.7) moc bierna zależy jedynie od składowej *y* prądu, czyli składowej biernej, a moc czynna zależy jedynie od składowej prądu *x*, czyli składowej czynnej. Podstawowym założeniem układu Synchrogenvertera jest, aby generator synchroniczny nie generował mocy biernej. Zatem układ regulacji ma za zadanie tak regulować prąd bierny przekształtnika, aby prąd bierny generatora synchronicznego był równy zero $i_{GVy} = 0$, czyli aby generator nie generował mocy biernej.

Układ Synchrogenvertera wyposażony w magazyn energii umożliwia również dostarczanie lub pobieranie przez przekształtnik prądu czynnego. Odpowiednia regulacja prądów czynnego i biernego przekształtnika uwzględniając wzory (5.1.2) i (5.1.3) umożliwia pośrednią regulację prądu generatora synchronicznego. Układ regulacji Synchrogenvertera z

magazynem energii przedstawiono na Rys. 5.1.1. Układ ten jest przeznaczony dla magazynu energii, który umożliwia rozładowanie lub ładowanie szybkozmiennym prądem np. bateria kwasowa lub nawet superkondensator. Również możliwe jest dostarczanie długotrwałej mocy czynnej do obciążenia z magazynu energii przez przekształtnik magazynu energii ESC i przekształtnik CV.

Układ regulacji z Rys. 5.1.1 można podzielić na trzy obwody. Obwód regulacji generatora synchronicznego, w którego skład wchodzi regulator prędkości maszyny napędowej Rωgv, regulator napięcia generatora Rugvx i regulator prądu wzbudzenia Rifv. Obwód regulacji przekształtnika CV, w którego skład wchodzą regulator napięcia obwodu pośredniczącego Rudc, regulator prądu biernego generatora Rigvy oraz regulatory prądu przekształtnika Ricvx i Ricvy. Oraz z obwodu regulacji magazynu energii, który składa się z regulatorów prędkości generatora Rωgvu i Rωgvd, z regulatorów napięcia magazynu energii Ruesu i Ruesd oraz z regulatorów napięcia obwodu pośredniczącego Rudcu i Rudcd.

Regulacja generatora synchronicznego odbywa się podobnie do standardowych układów regulacji maszyny napędowej i regulacji wzbudzenia opisanych w rozdziale 3.2 dla generatora pracującego autonomicznie. Dodatkowy zastosowany jest regulator zadanego prądu magazynu energii Ries2, którego sygnał wyjściowy jest dodawany do sygnału mierzonej prędkości ω_{GV} . Regulator Ries2 powoduje zwiększenie uchybu prędkości w maszynie napędowej w chwili, gdy przekształtnik CV dostarcza prąd czynny lub zmniejszenie uchybu prędkości w chwili, gdy przekształtnik pobiera moc czynną. Podczas planowanego ładowania lub rozładowania magazynu energii regulator Ries2 jest wyłączony i nie zmienia wartości zadanego momentu.

Przekształtnik CV regulowany jest we współrzędnych *xy* zaprezentowanych w rozdziale 4.1, które ułatwiają regulację rozpływu mocy między przekształtnikiem CV i generatorem synchronicznym GV. Przekształtnik pobierając moc czynną powoduje zwiększenie napięcia u_{dc} w obwodzie napięcia DC, a oddawanie mocy czynnej powoduje zmniejszanie napięcia u_{dc} . Regulator Rudc reguluje wartość prądu przekształtnika w osi $x i_{CVx}$, prądu czynnego tak, aby napięcie obwodu DC było równe napięciu zadanemu $u_{dc} = u_{dc}^*$. Regulator Rudc również odpowiada pośrednio za dostarczanie lub pobieranie mocy czynnej z magazynu energii BES. W przypadku, gdy przekształtnik magazynu energii ESC rozładowuje magazyn energii powoduje to zwiększenie napięcia u_{dc} . Napięcie u_{dc} wyższe od napięcia zadanego powoduje zwiększenie prądu czynnego przekształtnika, co powoduje dostarczenie mocy czynnej do obciążenia przez przekształtnik CV. Podobnie ładowanie magazynu energii powoduje zmniejszenie napięcia u_{dc} poniżej wartości zadanej, co zmniejsza prąd czynny

przekształtnika. Mniejszy prąd czynny niż zero oznacza pobieranie mocy czynnej przez przekształtnik CV.

Zakładając w stanie ustalonym stały prąd bierny obciążenia i uwzględniając równanie (5.1.3) jeśli zwiększy się prąd bierny przekształtnika i_{CVy} to prąd bierny generatora synchronicznego się zmniejszy. Umożliwia to regulację prądu biernego generatora poprzez odpowiednio regulowany prąd bierny przekształtnika. Zatem prąd bierny przekształtnika regulowany jest tak, aby prąd bierny generatora był równy wartości zadanej $i_{GVy} = i_{GVy}^*$. W układzie Synchrogenvertera generator synchroniczny w stanie ustalonym nie powinien generować mocy biernej, zatem zgodnie z równaniem (4.1.9) prąd bierny generatora zadany ma wartość równą zero.

$$i_{GVy}^{*} = 0$$
 (5.1.4)

Głównym regulatorem przekształtnika magazynu energii ESC jest regulator prędkości generatora synchronicznego Rogvu i Rogvd. Regulatory Rogvu i Rogvd utrzymują wartość prędkości tak, aby była w ustawianym zakresie od ω_{GVd} do ω_{GVu} . Podobnie regulatory Rudcd i Rudcg zmniejszają prąd rozładowania lub ładowania magazynu energii BES tak aby napięcie w obwodzie DC u_{dc} zawierało się w granicach od u_{dcd}^* do u_{dcg}^* . Granice powinny być tak dobrane, aby magazyn energii nie pracował przy małych zmianach obciążenia, jednocześnie zachowując zadane granice częstotliwości napięcia wyjściowego. Zmniejszenie prędkości spowodowane jest najczęściej skokowym dodaniem obciążenia, natomiast zwiększenie prędkości spowodowane jest zdjęciem obciążenia. Po zwiększeniu obciążenia, gdy prędkość spadnie poniżej progu dolnego $\omega_{GV} < \omega_{GVd}$ regulator Rwgvd zwiększy prąd rozładowania magazyn energii. Zgodnie z zasadą działania regulacji przekształtnika CV zwiększony zostanie prąd czynny przekształtnika powodując dostarczenie dodatkowej mocy czynnej do obciążenia, co spowoduje zmniejszenie prądu czynnego synchronicznego. Efektem, będzie generatora czego zmniejszenie momentu elektromagnetycznego hamującego wirnik generatora synchronicznego. Zgodnie ze wzorem (2.2.2) zmniejszenie momentu hamującego spowoduje zmniejszenie zmiany prędkości generatora. Jednak magazyn energii nie może dostarczać stale mocy czynnej. W przypadku, gdy magazyn energii jest rozładowywany następuje zadziałanie regulatora Ries2, który spowoduje zwiększenie momentu napędowego maszyny napędzającej. Zwiększanie momentu napędowego T_m powoduje zwiększenie się prędkości wirnika generatora, co powoduje zwiększenie generowanej mocy czynnej przez generator co w efekcie powoduje zmniejszenie prądu rozładowania magazynu energii. Stałą czasową regulatora Ries2, czyli stałą czasową zwiększania momentu w maszynie napędowej można dostosować do stałych czasowych mechanicznych zespołu maszyna napędowa - generator tak, aby nie nastąpiła oscylacja lub zbytnie przeregulowanie prędkości.



Rys. 5.1.1 Układ regulacji generatora synchronicznego, przekształtnika i magazynu energii w układzie Synchrogenvertera pracującego autonomicznie.

Na Rys. 5.1.2 przedstawiono wykres wektorowy układu Synchrogenvertera pracującego autonomicznie podczas zmiany obciążenia. W początkowej chwili nie występuje

prąd obciążenia, zatem napięcie wyjściowe generatora synchronicznego jest równe napięciu indukowanemu $e_{GV0} = u_{GV0}$. Następnie dołączane jest obciążenie na wyjściu, co powoduje zmniejszenie napięcia wyjściowego generatora synchronicznego do wartości u_{GVI} . Prędkość wału generatora synchronicznego zmniejsza się zgodnie z równaniem (2.2.2), co powoduje zwiększenie momentu napędowego silnika. Zmiana prędkości nie jest widoczna na wykresie wektorowym i skutkuje zmianą częstotliwości napięcia wyjściowego. W początkowej chwili cały prąd obciążenia dostarcza generator synchroniczny $i_{SGVI} = i_{GVI}$. Prąd wzbudzenia jest stały, więc napięcie indukowane generatora synchronicznego e_{GVI} się nie zmieni, lecz zmieni się kąt między napięciem indukowanym e_{GVI} i napięciem wyjściowym u_{GVI} do wartości δ_{GVI} . Zmiana kąta spowodowana jest spadkiem napięcia na reaktancji generatora synchronicznego u_{Xgl} . Przekształtnik CV zwiększa następnie prąd bierny (w osi y) do wartości i_{CV2} tak, aby prąd bierny generatora synchronicznego był równy $i_{GV} = 0$. Gdy przekształtnik dostarcza prąd bierny prąd wyjściowy generatora synchronicznego ma tylko składową czynną i_{GV2} . Zmniejszenie prądu biernego generatora synchronicznego powoduje zmniejszenie spadku napięcia na reaktancji generatora, co zwiększa napięcie wyjściowe do wartości u_{GV2} . Zwiększone napięcie wyjściowe powoduje przy stałym obciążeniu zwiększenie prądu wyjściowego do wartości isGV2. Następnie układ regulacji AVR zwiększa prąd wzbudzenia do takiej wartości, aby napięcie wyjściowe było równe wartości zadanej $u_{GV3}=u_{GV0}$.



Rys. 5.1.2 Wykres wektorowy Synchrogenvertera podczas regulacji prądu wyjściowego w pracy autonomicznej.

Do badań komputerowych zastosowano środowisko PSIM, które służy do projektowania układów elektroenergetycznych jak i do projektowania układów sterowania. W tym celu opracowano model układu Synchrogenvertera przedstawiony na Rys. 5.1.3. Generator synchroniczny zamodelowano we współrzędnych dq na podstawie modelu zaprezentowanego na Rys. 2.1.3. Uzwojenie wzbudzenia zasilane jest przez przekształtnik wzbudzenia z napięcia stałego. Przekształtnik CV połączony jest równolegle do wyjścia generatora synchronicznego GV. Generator i przekształtnik regulowany jest jak na Rys. 5.1.1. Dane elementów użytych w badaniach komputerowych przedstawiono w tabelach A.1.1. do A.1.4. Przekształtnik energoelektroniczny użyty w badaniach komputerowych przedstawiono na Rys. 5.1.4. Przekształtnik trójpoziomowy topologii NPC z dzielonym kondensatorem w obwodzie napięcia DC. Do wyrównywania napięć w układzie zastosowano układ z dławikiem i dwoma tranzystorami z diodami zwrotnymi. Układ ten ma za zadanie rozładować kondensator o wyższym napięciu i naładować kondensator o niższym napięciu. Magazyn energii modelowany jest poprzez kondensator o odpowiedniej pojemności i szeregowy rezystor odpowiadający rezystancji szeregowej magazynu energii. Przekształtnik magazynu energii umożliwia ładowanie i rozładowanie magazynu z kondensatorów przekształtnika.



Rys. 5.1.3 Schemat obwodu silnoprądowego układu Synchrogenvertera pracującego autonomicznie wykorzystany w badaniach komputerowych.



Rys. 5.1.4 Model trójpoziomowego przekształtnika CV i magazynu energii BES wykorzystany w badaniach komputerowych układu Synchrogenvertera.

Rys. 5.1.5 przedstawia prądy fazy *a* generatora i_{GVa} , przekształtnika i_{CVa} i prąd obciążenia i_{SGVa} układu Synchrogenvertera w stanie ustalonym. Dodatkowo przedstawione jest wyjściowe napięcie układu Synchrogenvertera u_{GVa} . Synchrogenverter generuje moc czynną i bierną równe wartościom znamionowym generatora synchronicznego $P_{SGV} = P_{GN}$ oraz $Q_{SGV} = Q_{GN}$. W przypadku zasilania takiego obciążenia przez klasyczny generator synchroniczny prąd wyjściowy generatora był by równy prądowi obciążenia $i_{Ga} = i_{SGVa}$. Prąd generatora i_{GVa} w układzie Synchrogenvertera jest w fazie z napięciem wyjściowym generatora u_{GVa} , co oznacza, że generator generuje tylko moc czynną. Prąd przekształtnika jest przesunięty o kąt $\pi/2$ względem napięcia wyjściowego, co oznacza, że przekształtnik dostarcza moc bierną indukcyjną. Kąt między prądem przekształtnika i napięciem generatora jest nieznacznie większy, niż $\pi/2$ ponieważ przekształtnik pobiera moc czynną potrzebną na pokrycie strat.



Rys. 5.1.5 Stan ustalony układu Synchrogenvertera podczas generacji mocy znamionowej czynnej i biernej generatora.

5.2 Stany pracy układu Synchrogenvertera pracującego autonomicznie

Połączenie generatora synchronicznego i równoległego przekształtnika z magazynem energii umożliwia dostarczenie dodatkowej mocy czynnej i biernej do obciążenia. W przypadku, gdy generator synchroniczny zasila odbiory zmieniające się w czasie niezbędne jest zastosowanie generatora synchronicznego o mocy równej maksymalnej długotrwałej mocy możliwej do wystąpienia. Jeśli zwiększone zostanie zapotrzebowanie na maksymalną

długotrwałą moc należy zastąpić generator takim o wyższej mocy lub zastosować dodatkowy generator. Stosowanie generatora synchronicznego o wyższej mocy znamionowej skutkuje zmniejszaniem sprawności takiego generatora, jak i zmniejszenie sprawności maszyny napędowej, w chwili, gdy nie generuje on mocy znamionowej. W celu maksymalnego wykorzystania generatora synchronicznego należy zastosować generator synchroniczny i maszynę napędową o mocy równej mocy średniej ze wszystkich stanów obciążenia. W przypadku zmniejszonego zapotrzebowania należy magazynować energię, która następnie dostarczana jest do obciążenia podczas obciążenia powyżej mocy znamionowej. W praktyce jednak stosuje się generator o wyższej mocy znamionowej w celu zachowania zapasu mocy. Dodatkowo ładowanie przeprowadzane jest podczas obciążenia nieco niższego niż moc średnia, a rozładowanie przy obciążeniu nieco wyższym niż moc średnia. Stany pracy dla takich przypadków opisane zostały w literaturze [C3, D1, P3, P4].

Synchrogenverter umożliwia pracę w różnych stanach w zależności od dostarczanej mocy czynnej bądź biernej przez generator lub przekształtnik [K3 - K8]. Stany pracy Synchrogenvertera, opisane w dalszych podrozdziałach, można podzielić następująco:

- a) Generator synchroniczny dostarcza moc czynną przekształtnik dostarcza moc bierną,
- b) Generator synchroniczny dostarcza moc czynną przekształtnik dostarcza moc czynną i moc bierną,
- c) Generator synchroniczny dostarcza moc czynną przekształtnik dostarcza moc bierną i pobiera moc czynną z generatora synchronicznego,
- d) Generator synchroniczny dostarcza moc czynną i bierną przekształtnik dostarcza moc czynną i moc bierną,
- e) Generator synchroniczny dostarcza moc czynną i bierną przekształtnik dostarcza moc czynną.

5.2.1 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza moc bierną

Stan pracy występuje w przypadku, gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną nie jest większe niż znamionowa moc czynna generatora. Możliwe jest wtedy generowanie mocy czynnej przez generator równej znamionowej mocy pozornej generatora, co zostało opisane w rozdziale 4.2. Wykres wektorowy dla tego stanu pracy przedstawia Rys. 5.2.1. Zgodnie z rozważaniami w rozdziale 4.1 w układzie współrzędnych *xy* prąd osi *x* odpowiada mocy

czynnej a prąd w osi *y* odpowiada mocy biernej. Przekształtnik do poprawnego działania pobiera prąd czynny i_{CVx} potrzebny na pokrycie strat. Na wykresie wektorowym przedstawiono przesadnie duży wektor prądu czynnego pobieranego przez przekształtnik CV. Pobierana moc czynna jest dużo mniejsza niż wyjściowa moc układu. Moc czynna na pokrycie strat przekształtnika może być również dostarczana ze źródła mocy czynnej dołączonego do wyjścia napięcia DC przekształtnika. W takim przypadku prąd w osi *x* przekształtnika będzie równy zero. Generator synchroniczny generuje w stanie ustalonym tylko moc czynną, więc posiada tylko składową prądu w osi czynnej $i_{GV} = i_{GVx}$. Wektor prądu wyjściowego jest sumą wektora prądu generatora i prądu przekształtnika $i_{Lo} = i_{GV} + i_{CV}$. W takim stanie pracy możliwe jest osiągnięcie mocy pozornej na wyjściu układu równej 125% znamionowej mocy pozornej generatora synchronicznego przy zachowaniu stałego znamionowego współczynnika mocy.



Rys. 5.2.1 Wykres wektorowy prądów Synchrogenvertera dla przypadku, gdy generator synchroniczny generuje moc czynną a przekształtnik dostarcza moc bierną.

5.2.2 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza moc czynna i bierną

Przykładowy wykres wektorowy dla tego przypadku przedstawiony jest na Rys. 5.2.2. Moc czynna dostarczana do obciążenia i_{Lox} jest sumą prądu czynnego generowanego w generatorze synchronicznym i_{GVx} i prądu dostarczanego z magazynu energii

przez przekształtnik i_{CVx} . Generator synchroniczny generuje tylko moc czynną, zatem posiada tylko składową czynną prądu $i_{GV} = i_{GVx}$. Natomiast przekształtnik dostarcza mocy czynnej i biernej, zatem ma składowe czynną i bierna $i_{CV} = i_{CVx} + ji_{CVy}$. Ten stan pracy umożliwia dostarczenie mocy czynnej większej niż 125% P_{GN} przy jednoczesnym dostarczaniu mocy biernej z przekształtnika.



Rys. 5.2.2 Wykres wektorowy prądów Synchrogenvertera dla przypadku, gdy generator synchroniczny generuje moc czynną a przekształtnik dostarcza moc czynną i bierną.

Stan pracy występuje, gdy obciążenie jest większe niż maksymalna moc czynna możliwa do generacji przez generator synchroniczny, lub w przypadku gdy przekształtnik zmniejsza oddziaływanie zmiany obciążenia na prędkość i napięcie generatora. W stanie ustalonym po zwiększeniu obciążenia generator synchroniczny generuje moc czynną równą mocy czynnej maksymalnej. Moc czynna generowana przez generator synchroniczny jest ograniczona mocą turbiny lub napędzającego silnika spalinowego, jak również maksymalnym długotrwałym prądem pracy generatora [L4, M4, P5]. Jeśli obciążenie ma wartość większą niż moc maksymalna zmniejszona jest prędkość wału generatora, czyli mniejsza częstotliwość niż częstotliwość znamionowa. W skrajnych przypadkach może dojść do odłączenia całego obciążenia, lub nawet zatrzymania generatora.

Innym przykładem dla tego stanu pracy jest przypadek rozładowania magazynu energii w chwili zwiększonego zapotrzebowania obciążenia na moc czynną. Przykładem tego może być skokowa zmiana obciążenia. Przekształtnik dostarcza wtedy moc czynną zgromadzoną w magazynie energii. Dostarczenie dodatkowej szybkozmiennej mocy czynnej z magazynu energii umożliwia stabilizację prędkości ω_{GV} i kąta położenia wirnika δ_{GV} generatora synchronicznego.

5.2.3 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza moc bierną i pobiera moc czynną

Stan pracy występuje w sytuacji, gdy obciążenie pobiera mniejszą wartość mocy czynnej niż moc znamionowa generatora synchronicznego. Zazwyczaj do ładowania magazynu energii dochodzi podczas przewidywanego czasu najmniejszego obciążenia [P3, P4]. Czas ładowania jest tak dobierany, aby generator synchroniczny był dociążony podczas najmniejszego obciążenia. Możliwe jest również pobieranie dodatkowej szybkozmiennej mocy czynnej w przypadku nagłego odłączenia obciążenia. Przy odpowiedniej regulacji możliwa jest stabilizacja prędkości jak i zwiększenie stabilności generatora podczas odłączenia obciążenia. Przykładowy wykres wektorowy przedstawiający powyższy stan pracy Synchrogenvertera przedstawiono na Rys. 5.2.3.

5.2.4 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym generator synchroniczny i przekształtnik dostarcza moc czynną i bierną

Stan ten występuje w przypadku, gdy obciążenie wymaga na tyle dużo mocy biernej, że niezbędne jest dostarczenie mocy czynnej i biernej z przekształtnika i generatora. Przekształtnik ma ograniczoną moc wyjściową limitowaną prądem wyjściowym. Jeśli obciążenie jest na tyle duże, że przekształtnik dostarcza maksymalną długotrwałą moc pozorną, wynikającą z dostarczania prądu czynnego i biernego, generator synchroniczny może generować dodatkową moc bierną. Również przykładem może być rozruch silnika indukcyjnego który pobiera dużo więcej mocy biernej jak mocy czynnej. Generacja mocy biernej przez generator synchroniczny możliwa jest jednak tylko przy założeniu, że nie generuje mocy czynnej równej 125% P_{GN} . W przypadku osiągnięcia przez przekształtnik maksymalnej mocy biernej Q_{CV_max} wyjściowej możliwe jest generowanie dodatkowej mocy biernej przez generator (Rys. 5.2.4). Umożliwia to powiększenie dostępnej mocy biernej generowanej do obciążenia.



Rys. 5.2.3 Wykres wektorowy prądów Synchrogenvertera dla przypadku, gdy generator synchroniczny generuje moc czynną a przekształtnik dostarcza moc czynną i bierną.



Rys. 5.2.4 Dostępna moc bierna układu Synchrogenvertera.

Stan ten występuje również w momencie wystąpienia zmiany obciążenia. Generator synchroniczny generuje napięcie wyjściowe, zatem każda zmiana obciążenia spowoduje w pierwszej chwili obciążenie generatora. Z chwilą gdy zacznie narastać prąd bierny generatora

prąd bierny przekształtnika natychmiast zostanie wyregulowany tak aby zmniejszyć prąd bierny generatora do wartości zerowej.

Stan pracy może również występować w przypadku źródeł odnawialnych jak fotowoltaika lub źródła wiatrowe. Przekształtniki tam zastosowane mogą dostarczać moc czynną, gdy źródło na to pozwala a pozostałą moc przeznaczyć na dostarczanie mocy biernej. Wykres wektorowy dla tego stanu pracy przedstawia Rys. 5.2.5.



Rys. 5.2.5 Wykres wektorowy prądów Synchrogenvertera dla przypadku, gdy generator synchroniczny generuje moc czynną i bierną oraz przekształtnik dostarcza moc czynną i bierną.

5.2.5 Stan pracy układu Synchrogenvertera, w którym przekształtnik dostarcza lub pobiera moc czynną

Stan ten występuje w sytuacji, gdy przekształtnik dostarcza prąd czynny równy maksymalnemu prądowi wyjściowemu przekształtnika, np. źródła odnawialne. W tym przypadku układ regulacji umożliwia tylko dostarczanie mocy czynnej przez przekształtnik. Generator synchroniczny dostarcza wtedy moc czynną oraz niezbędną moc bierną. Dostarczanie mocy czynnej może być spowodowane regulacją mocy czynnej magazynu energii w celu pokrycia szczytowych obciążeń w systemie lub przesunięcie obciążenia na

okresy pozaszczytowe [C3, D1, P3, P4]. Jeśli układ regulacji wymusza prąd czynny równy prądowi maksymalnemu przekształtnika to nie dostarcza on mocy biernej. Wykres wektorowy dla tego przypadku przedstawia Rys. 5.2.6.

Układ Synchrogenvertera z magazynem energii umożliwia dostarczenie lub pobieranie mocy czynnej do obciążenia. Zatem odpowiednia regulacja przekształtnika umożliwia zmniejszenie mocy znamionowej generatora, również zmniejszenie gabarytów samego generatora. Dodatkowo przekształtnik daje możliwość regulacji mocy biernej generatora synchronicznego, co umożliwia stabilizację wyjściowego napięcia i częstotliwości.



Rys. 5.2.6 Wykres wektorowy prądów Synchrogenvertera dla przypadku, gdy generator synchroniczny generuje moc czynną i bierną a przekształtnik dostarcza moc czynną.

5.3 Praca autonomiczna układu Synchrogenvertera zasilającego obciążenie symetryczne

W celu sprawdzenia poprawności algorytmów regulacji niezbędna jest analiza odpowiedzi układu na zmianę obciążenia. Podczas analizy połączone są ze sobą przekształtnik CV i generator synchroniczny GV. Do przekształtnika CV jest dołączony magazyn energii BES. Wartości parametrów użyte w badaniach komputerowych przedstawione są z załączniku A.1, parametry przekształtnika CV przedstawiono w tabeli

A.1.3, parametry magazynu energii BES w tabeli A.1.4, parametry symulacji w tabeli A.1.2 oraz parametry generatora synchronicznego GV w tabeli A.1.1.

Na Rys. 5.3.1 przedstawiono zmianę obciążenia z $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$ na $1P_{GN}$ i $1Q_{GN}$ i z powrotem na $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$.



Rys. 5.3.1 Odpowiedź układu Synchrogenvertera na zmianę obciążenia z $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$ na $1P_{GN}$ i $1Q_{GN}$ i z powrotem na $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$ a) prądy generatora synchronicznego GV w układzie Synchrogenvertera, b) prądy obciążenia zasilanego z układu Synchrogenvertera i_{Loa} , i_{Lob} , i_{Loc} .

Rys. 5.3.1a przedstawia wartości chwilowe prądów generatora synchronicznego podczas zmiany obciążenia. W początkowej chwili generator synchroniczny dostarcza mocy czynnej równej $0.2P_{GN}$ mocy znamionowej. Następnie w chwili 5.1s dołączane jest

obciążenie przy czym obciążenie Synchrogenvertera jest równe znamionowej mocy generatora synchronicznego $S_{Lo} = S_{GN}$. Na Rys. 5.3.1b prądy obciążenia osiągają wartość ustaloną po ok. 0.5s. Zmiany prądu obciążenia są spowodowane zmianą napięcia wyjściowego $|u_{GV}|$. W początkowej chwili po zmianie obciążenia prąd obciążenia generowany jest poprzez generator synchroniczny. Dlatego podczas zwiększenia obciążenia następuje zmniejszenie prędkości ω_{GV} i modułu napięcia generatora $|u_{GV}|$, a podczas zmniejszenia obciążenia prąd obciążenia prąd obciążenia następuje zwiększenie prędkości i napięcia. Spadek prędkości poniżej wartości zadanej $\omega_{GV} < \omega_{GV_{zad}}$ powoduje rozładowanie magazynu energii co oznacza dostarczenie dodatkowej mocy czynnej przez przekształtnik. Przy stałym obciążeniu i przy zachowaniu stałego modułu napięcia wyjściowego $|u_{GV}|$, zwiększenie prądu czynnego przekształtnika powoduje zmniejszenie prądu czynnego generatora synchronicznego.

W klasycznym generatorze synchronicznym każda zmiana obciążenia powoduje zmianę prędkości ω_{GV} zgodnie ze wzorem (2.2.2) oraz zmianę położenia δ_{GV} zgodnie ze wzorem (2.2.1). Za zmianę prędkości odpowiedzialny jest moment elektromagnetyczny T_e wytworzony przez przepływ prądu w uzwojeniach stojana. Moment elektromagnetyczny wyrażony jest wzorem (2.2.3). Moment ten zależny jest od mocy czynnej wyjściowej generatora P_G . Pomijając straty w generatorze synchronicznym klasycznym moment elektromagnetyczny można zapisać, jako

$$T_e = \frac{P_G}{\omega_G} \tag{5.3.1}$$

Gdzie ω_G – aktualna prędkość wału generatora synchronicznego w [rad/s].

W klasycznym generatorze cała moc obciążenia wytwarza moment elektromagnetyczny $P_G = P_{Lo}$. Zatem wzór (2.2.2) na zmianę prędkości generatora można zapisać, jako

$$\frac{d(\omega_G - \omega_S)}{dt} = \frac{p}{J_g} \left(T_m - \frac{P_{Lo}}{\omega_G} - T_D \right)$$
(5.3.2)

Gdzie ω_S – prędkość synchroniczna generatora synchronicznego.

W układzie Synchrogenvertera generator synchroniczny połączony jest z przekształtnikiem, który umożliwia dostarczenie dodatkowej mocy czynnej do obciążenia zgodnie z (4.2.7). Przekształcając (4.2.7) moc generatora jest różnicą mocy obciążenia i mocy dostarczanej przez przekształtnik

$$P_{GV} = P_{Lo} - P_{CV} \tag{5.3.3}$$

Oznacza to możliwość zmniejszenia oddziaływania obciążenia na moment elektromagnetyczny. Przekształtnik umożliwia regulowaną i szybką zmianę prądu wyjściowego. Możliwe jest, zatem dostarczenie odpowiedniej mocy czynnej przez przekształtnik do obciążenia tak, aby zminimalizować zmianę prędkości generatora synchronicznego.

$$\frac{d(\omega_{GV} - \omega_S)}{dt} = \frac{p}{J_g} \left(T_m - \frac{P_{Lo} - P_{CV}}{\omega_{GV}} - T_D \right)$$
(5.3.4)

W idealnym przykładzie zmiana mocy czynnej obciążenia będzie równa mocy czynnej dostarczanej przez przekształtnik i zmiana obciążenia nie będzie powodować zmiany prędkości generatora $d\omega_{GV} = 0$. Jednak działanie układu regulacji jak i ograniczenia przekształtnika powodują chwilową zmianę prędkości ω_{GV} tak jak w przypadku z Rys. 5.3.1.

W przypadku jak na Rys. 5.3.1 w stanie ustalonym prędkość generatora synchronicznego jest stała równa prędkości synchronicznej $\omega_{GV} = \omega_S$, napięcie wyjściowe generatora jest równe wartości zadanej oraz prąd magazynu energii jest równy zero. Oznacza to prawidłowe działanie układu regulacji.

Chwilę załączenia obciążenia przedstawia Rys. 5.3.2, natomiast chwilę odłączenia obciążenia przedstawia Rys. 5.3.3. W chwili początkowej obciążenie jest równe 20% znamionowej mocy czynnej P_{GN} i biernej Q_{GN} generatora synchronicznego, czyli P_{Lo} = $0.2P_{GN}$, $Q_{Lo} = 0.2Q_{GN}$. Generator synchroniczny GV generuje tylko moc czynną zatem prąd fazy a i_{GVa} jest w fazie z napięciem fazy a u_{GVa} . W chwili czasowej 5.1s dołączone jest obciążenie 80% znamionowej mocy czynnej i biernej generatora synchronicznego, czyli całkowite obciążenie jest równe $P_{Lo} = P_{GN}$, $Q_{Lo} = Q_{GN}$. W chwili dołączenia dodatkowego obciążenia generator synchroniczny dostarcza całą dodatkową moc czynną i bierną. Przekształtnik CV w trakcie ok. jednego półokresu napięcia przejmuje cały prąd bierny generatora synchronicznego. Generator dostarcza jednak cała moc czynną do obciążenia co powoduje zmniejszenie prędkości ω_{GV} . Zmniejszenie prędkości powoduje zwiększenie prądu rozładowania magazynu energii iBES co powoduje zwiększenie prądu czynnego przekształtnika. Moc czynna dostarczana przez przekształtnik CV powoduje zmniejszenie obciążenia generatora synchronicznego mocą czynną i stabilizację prędkości. Regulator prądu wzbudzenia Ries2 powoduje zwiększenie momentu napędowego T_m , z określoną stałą czasową aby nie występowały zmiany prędkości generatora, w celu zmniejszenia prądu magazynu i_{BES} energii do zera. Podobne przedstawia się proces regulacji podczas odłączenia obciążenia z Rys.5.3.3.







Rys. 5.3.3 Przebiegi prądów i napięć w układzie Synchrogenvertera podczas zmniejszenia obciążenia o $0.8P_{GN}$ i $0.8Q_{GN}$ a) wartości chwilowe prądów generatora synchronicznego i_{GVa} , i_{GVb} , i_{GVc} , b) wartości chwilowe prądów obciążenia i_{Loa} , i_{Lob} , i_{Loc} .

Porównanie pracy generatora synchronicznego w przypadku klasycznym i w przypadku generatora w układzie Synchrogenvertera przedstawiono na Rys.5.3.4 i Rys. 5.3.5. Porównanie odpowiedzi przeprowadzone jest dla tego samego układu regulacji generatora synchronicznego przy tych samych nastawach regulatorów. Porównane są układy klasycznego generatora synchronicznego, układ Synchrogenvertera bez magazynu energii gdzie $k_{BES} = 0$, oraz z magazynem energii z możliwością dostarczenia mocy czynnej równej 200kW gdzie $k_{BES} = 0.5$. Na Rys. 5.3.4a przedstawiono porównanie prędkości generatora synchronicznego ω_{GV} . Początkowo obciążenie jest równe $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$. w chwili czasowej

t = 5.1s dołączone jest obciążenie $0.8P_{GN}$ i $0.8Q_{GN}$. Pod wpływem zmiany obciążenia prędkość klasycznego generatora ω_G spadła o ok. 7%. Podobnie do generatora klasycznego wygląda przebieg prędkości dla Synchrogenvertera bez magazynu energii $\omega_{GV}(k_{BES}=0)$, co jest spowodowane dostarczeniem potrzebnej mocy czynnej tylko przez generator. Jednak dla układu Synchrogenvertera z magazynem energii zmiana prędkości $\omega_{GV}(k_{BES}=0.5)$ wynosi ok. 1%. Spowodowane jest to, jak jest opisane w rozdziale 5.3, dostarczeniem dodatkowej mocy czynnej przez przekształtnik. Podobnie zachowuje się układ podczas odłączenia obciążenia w chwili t = 15s. Na Rys. 5.3.4b przedstawiona jest wartość momentu elektromagnetycznego hamującego wirnik. W przypadku układu Synchrogenvertera moment elektromagnetyczny T_{eGV} charakteryzuje się znacznie mniejszą zmianą niż moment elektromagnetyczny dla generatora klasycznego T_{eG} . Mniejsza zmiana momentu powoduje mniejsze zmiany prędkości generatora ω_{GV} .

Porównanie modułu napięcia wyjściowego przedstawiono na Rys.5.3.5a. Zmiana modułu napięcia $|u_G|$ w klasycznym generatorze podczas dołączenia obciążenia $0.8P_{GN}$ i $0.8Q_{GN}$ powoduje zmniejszenie modułu napięcia powyżej 21%. Zmiana napięcia generatora jest zależna od zmiany mocy biernej generowanej przez generator. W układzie Synchrogenvertera przekształtnik dostarcza mocy biernej, co powoduje mniejszą zmianę modułu napięcia $|u_{GV}|(k_{BES}=0)$ o ok. 11%. Regulator modułu napięcia Rugvx wraz ze zwiększeniem prędkości ω_{GV} powoduje chwilowe zwiększenie modułu napięcia powyżej wartości zadanej. Zwiększenie modułu napięcia nie występuje dla układu Synchrogenvertera z magazynem energii ponieważ nie występuje tam znaczna zmiana prędkości. Prądy wzbudzenia generatora synchronicznego dla generatora klasycznego i_{fG} i dla układu Synchrogenvertera i_{fGV} przedstawione są na Rys.5.3.5b. Wartość prądu wzbudzenia dla generatora klasycznego i_{fG} w stanie ustalonym osiąga wartość znamionową $i_{fG} = 1$ [pu], natomiast prąd wzbudzenia dla układu Synchrogenvertera osiąga wartość ok. 70% prądu znamionowego. Zmniejszenie prądu wzbudzenia spowodowane jest tym, że generator nie generuje mocy biernej. W stanie ustalonym w układzie Synchrogenvertera prąd wzbudzenia jest równy dla układu z magazynem energii ($k_{BES} = 0.5$) i bez magazynu energii ($k_{BES} = 0$).

Moduł napięcia generatora $|u_{GV}|$ w układzie Synchrogenvertera posiada dodatkowe oscylacje w przypadku zmiany obciążenia. Jest to spowodowane regulatorem napięcia dostrojonym do pracy z samym generatorem. Stabilizacja prędkości jak i dostarczanie mocy biernej przez przekształtnik powoduje zmniejszenie zmian modułu napięcia wyjściowego. Dostarczanie mocy czynnej jak i biernej przez przekształtnik powoduje zmianę obiektu regulacji dla regulatora modułu napięcia Rugvx, regulatora prądu wzbudzenia Rif jak i dla regulatora maszyny napędzającej Rωgv. Może to spowodować zwiększone oscylacje prędkości lub napięcia wyjściowego. Przy zastosowaniu układu Synchrogenvertera niezbędne jest dostrojenie regulatorów generatora synchronicznego.



Rys. 5.3.4 Porównanie odpowiedzi układu Synchrogenvertera i klasycznego generatora synchronicznego na skok obciążenia z $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$ na $1P_{GN}$ i $1Q_{GN}$ następnie na $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$, a) przebiegi prędkości generatora synchronicznego klasycznego ω_G , oraz prędkości generatora w układzie Synchrogenvertera ω_{GV} , b) przebiegi momentów elektromagnetycznych dla generatora klasycznego T_{eG} oraz generatora w układzie Synchrogenvertera T_{eGV} .



Rys. 5.3.5 Porównanie odpowiedzi układu Synchrogenvertera i klasycznego generatora synchronicznego na skok obciążenia z $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$ na $1P_{GN}$ i $1Q_{GN}$ następnie na $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$, a) przebiegi modułu napięcia wyjściowego generatora synchronicznego klasycznego $|u_G|$, oraz modułu napięcia generatora w układzie Synchrogenvertera $|u_{GV}|$, b) przebiegi prądów wzbudzenia generatora dla generatora klasycznego i_{fG} oraz generatora w układzie Synchrogenvertera i_{fGV} .

Można również potwierdzić obliczenia strat mocy w generatorze synchronicznym przedstawione w rozdziale 4.3. Przyjmując prąd wzbudzenia klasycznego generatora podczas obciążenia znamionowego w stanie ustalonym jest równy $i_{fG} = 1$ [pu], natomiast w przypadku Synchrogenvertera prąd wzbudzenia jest równy $i_{fGV} = 0.701$ [pu]. Zatem zmniejszenie strat we wzbudzeniu generatora synchronicznego można wyznaczyć ze wzoru (4.3.11) jako

$$\delta P_f = \frac{i_{fG}^2 - i_{fGV}^2}{i_{fG}^2} * 100\% = 50.86\%$$
(5.3.5)

Wartość zgadza się z wartością wyznaczoną w rozdziale 4.3 co potwierdza poprawność wyznaczonych wzorów oraz obliczeń.

Zmiana obciążenia powoduje zmianę parametrów wyjściowych napięcia. Rozruch silnika indukcyjnego IM jest przykładem szybkozmiennej zmiany mocy biernej. Podczas rozruchu pobierana moc bierna jest kilkukrotnie większa niż znamionowa moc bierna silnika indukcyjnego [S2]. Przypadek rozruchu silnika indukcyjnego z układu Synchrogenvertera przedstawia Rys. 5.3.6.





Początkowe obciążenie jest równe 50% obciążenia znamionowego generatora synchronicznego $P_{Lo} = 0.5P_{GN}$, $Q_{Lo} = 0.5Q_{GN}$. W chwili czasowej 5s dołączony jest silnik indukcyjny o parametrach przedstawionych w załączniku A.1 w tabeli A.1.5. Silnik indukcyjny IM podczas rozruchu nie jest obciążony. Obciążenie silnika następuje w czasie 15s. Silnik obciążony jest momentem znamionowym $t_{IM} = 1T_{IMN}$. W stanach przejściowych magazyn energii BES jest rozładowywany lub ładowany tak aby prędkość generatora synchronicznego była równa wartości zadanej $\omega_{GV} = \omega_{GV_zad}$. Układ regulacji zapewnia stałe wartości prędkości ω_{GV} i modułu napięcia $|u_{GV}|$ w stanie ustalonym. W stanie ustalonym prąd magazynu energii jest równy zero $i_{BES} = 0$.

Porównanie odpowiedzi klasycznego generatora synchronicznego i generatora synchronicznego w układzie Synchrogenvertera dla przypadku rozruchu silnika indukcyjnego przedstawiono na Rys. 5.3.7 i Rys. 5.3.8. Podobnie jak dla zmiany obciążenia generator w układzie Synchrogenvertera z magazynem energii cechuje się zmianą prędkości poniżej 1% podczas zmiany obciążenia $\omega_{GV}(k_{BES} = 0.5)$. Również w tym przypadku występuje zmniejszenie zmiany momentu elektromagnetycznego $T_{eGV}(k_{BES} = 0.5)$ co przekłada się na mniejszą zmianę prędkości.

Na Rys. 5.3.8a przedstawione jest porównanie modułu wyjściowego napięcia generatora dla generatora klasycznego $|u_G|$ i generatora pracującego w układzie Synchrogenvertera $|u_{GV}|$. Napięcie klasycznego generatora synchronicznego $|u_G|$ podczas rozruchu silnika indukcyjnego nie osiąga wartości zadanej. Jest to spowodowane ograniczeniem prądu wzbudzenia generatora i_{fG} jak i charakterem obciążenia. Silnik indukcyjny IM podczas rozruchu pobiera znacznie większą moc bierną [S2]. W celu generacji zwiększonej mocy biernej niezbędne jest wytworzenie wysokiego napięcia indukowanego w generatorze synchronicznym E_G zgodnie z Rys. 3.1.5. Większe napięcie indukowane wytworzone jest poprzez zwiększenie prądu wzbudzenia i_{fG} zgodnie ze wzorem (2.1.32). Jeśli jednak prąd wzbudzenia osiągnie wartość maksymalną napięcie indukowane nie osiągnie prawidłowej wartości co w efekcie spowoduje zmniejszenie napięcia wyjściowego z generatora synchronicznego $|u_G|$. Zmniejszone napięcie zasilania dla odbiorów może negatywnie oddziaływać na ich pracę co jest opisane w [M3]. Układ Synchrogenvertera umożliwia dostarczenie dodatkowej mocy biernej z przekształtnika co umożliwia generację napięcia wyjściowego równego wartości zadanej. Zastosowanie Synchrogenvertera z magazynem energii BES umożliwia stabilizacje modułu napiecia podczas rozruchu silnika poniżej 5%. Podobnie jak dla zmiany obciążenia prąd wzbudzenia w układzie Synchrogenvertera jest dużo mniejszy niż w klasycznym generatorze $i_{fG} > i_{fGV}$.

69







Rys. 5.3.8 Porównanie odpowiedzi układu Synchrogenvertera i klasycznego generatora synchronicznego w przypadku rozruchu silnika indukcyjnego 100kW, a) przebiegi modułu napięcia wyjściowego generatora synchronicznego klasycznego $|u_G|$, oraz modułu napięcia generatora w układzie Synchrogenvertera $|u_{GV}|$, b) przebiegi prądów wzbudzenia generatora

dla generatora klasycznego i_{fG} oraz generatora w układzie Synchrogenvertera i_{fGV} .

5.4 Praca układu Synchrogenvertera zasilającego odbiory o mocy przekraczającej moc znamionową generatora synchronicznego

Jak zostało opisane w rozdziale 4.2 układ Synchrogenvertera umożliwia dostarczenie większej mocy do obciążenia. Przykład zasilania obciążenia większego niż znamionowa moc generatora synchronicznego przedstawia Rys. 5.4.1.



Rys. 5.4.1 Przebiegi prądów i napięć w układzie Synchrogenvertera podczas zmiany obciążenia ze stanu jałowego na obciążenie $100\% P_{GN}$ i $100\% Q_{GN}$, następnie obciążenie $125\% P_{GN}$ i $125\% Q_{GN}$ oraz obciążenie $175\% P_{GN}$ i $125\% Q_{GN}$, a) przebiegi prądów fazowych generatora i_{GVa} , i_{GVb} , i_{GVc} , prędkość generatora synchronicznego ω_{GV} , modułu napięcia generatora $|u_{GV}|$ oraz prądu magazynu energii i_{BES} , b) przebiegi prądów obciążenia i_{Loa} , i_{Lob} ,

 i_{Loc} .
Przebiegi prądów generatora synchronicznego GV nie przekraczają wartości znamionowych podczas stanu ustalonego. Podczas obciążenia mocą czynną mniejszego niż 125% P_{GN} , moc czynna dostarczana jest przez generator synchroniczny. Jednak gdy w chwili czasowej t = 25s obciążenie zwiększone jest do wartości 175% P_{GN} generator synchroniczny nie zwiększa generowanej mocy czynnej. Generator synchroniczny generuje 125% P_{GN} a resztę mocy dostarcza magazyn energii BES. Do obciążenia dostarczana jest moc czynna z przekształtnika CV, gdzie ujemny prąd magazynu energii, $i_{BES} < 0$, oznacza rozładowanie magazynu BES. Na Rys. 5.4.1 w stanie ustalonym przy każdym obciążeniu zachowana jest stała wartość modułu wyjściowego napięcia generatora $|u_{GV}|$ oraz prędkość generatora synchronicznego ω_{GV} . W stanach przejściowych magazyn energii dostarcza dodatkowej mocy czynnej jak w przypadku zmiany obciążenia. Przebiegi prądów i napięcia jednej fazy w przypadku zasilania obciążenia równego 175% P_{GN} i 125% Q_{GN} przedstawione są na Rys. 5.4.2. Prąd generatora synchronicznego i_{GVa} jest w fazie z napięciem u_{GVa} co oznacza, że generator generuje tylko moc czynną. Prąd przekształtnika i_{CVa} przesunięty jest o kąt mniejszy niż $\pi/2$ co oznacza że przekształtnik dostarcza mocy czynnej jak i biernej.



Rys. 5.4.2 Przebiegi prądów jednej fazy generatora i_{GVa} , przekształtnika i_{CVa} , obciążenia i_{Loa} oraz przebieg napięcia odpowiadającej fazy u_{GVa} w układzie Synchrogenvertera w stanie ustalonym podczas zasilania obciążenia 175% P_{GN} i 125% Q_{GN} .

5.5 Praca układu Synchrogenvertera zasilającego odbiory niesymetryczne i nieliniowe

W celu zasilania odbiorów asymetrycznych jak i nieliniowych niezbędna jest zmiana układu regulacji względem układu z Rys. 5.1.1. Założeniem układu regulacji jest aby prądy generatora synchronicznego GV były zbliżone kształtem do przebiegu sinusoidalnego oraz aby amplituda prądu była równa w każdej fazie. Układ regulacji Synchrogenvertera jest taki sam dla generatora synchronicznego GV jak i dla magazynu energii BES. Zmieniony jest układ regulacji przekształtnika CV, którego schemat blokowy przedstawia Rys. 5.5.1. Przedstawiony układ regulacji ma za zadanie jedynie przedstawić możliwość zasilania obciażeń asymetrycznych i nieliniowych w układzie Synchrogenvertera. Do zadanych wartości prądów przekształtnika i_{CVx} * i i_{CVy} * dodawana jest wartość prądu obciążenia tętniąca. Od wartości prądu obciążenia iLox odejmowana jest wartość składowej podstawowej (po filtrze dolnoprzepustowym LPF) co powoduje dodanie tętnień do prądu przekształtnika i_{CVx}. Zmienny prąd czynny i_{CVx} lub bierny i_{CVy} przekształtnika powoduje zmianę napięcia u_{dc} . Do pomiaru napięcia należy dodać filtr który wyfiltruje częstotliwość tętnień odbioru asymetrycznego. W przypadku asymetrii obciążenia w układzie współrzędnych xy składowe prądu czynnego i biernego posiadają składową tętniącą o częstotliwości dwukrotnie większej od częstotliwości podstawowej. W celu zmniejszenia asymetrii obciażenia niezbędne jest zastosowanie filtra BSF o częstotliwości zaporowej równej 100Hz. Powoduje to możliwość tętnień napięcia u_{dc} z częstotliwością zastosowanego filtru.



Rys. 5.5.1 Schemat blokowy układu regulacji przekształtnika CV Synchrogenvertera w przypadku zasilania odbiorników nieliniowych oraz z asymetrycznym obciążeniem.

Odpowiedź układu Synchrogenvertera na obciążenie asymetryczne przedstawiono na Rys. 5.5.2.



Rys. 5.5.2 Przebiegi prądów i napięć w układzie Synchrogenvertera podczas zasilania obciążenia asymetrycznego a) wartości chwilowe prądów generatora synchronicznego i_{GVa} , i_{GVb} , i_{GVc} oraz wartość chwilowa napięcia fazy a u_{GVa} , b) wartości chwilowe prądów obciążenia i_{Loa} , i_{Lob} , i_{Loc} oraz wartość chwilowa napięcia fazy a u_{GVa} .

Prądy fazowe i_{Loa} , i_{Lob} , i_{Loc} na Rys. 5.5.2b przedstawiają asymetrię prądów obciążenia. Faza a obciążona jest prądem równym 20% prądu znamionowego jednej fazy generatora, fazy b i c obciążone są prądem równym 60% prądu znamionowego jednej fazy generatora. Stan taki może odpowiadać przypadkowi uszkodzenia przewodu zasilającego fazy

a w obciążeniu. Obciążenie asymetryczne powoduje tętnienie prądów czynnego i biernego. Tętniące obciążenie powoduje dodatkowe straty w generatorze synchronicznym GV jak i w silniku napędowym DE. Może prowadzić do szybszego zużycia części mechanicznych. Na Rys. 5.5.2a układ regulacji przekształtnika CV reguluje taki prąd czynny i_{CVx} * i bierny i_{CVy} * aby prądy generatora synchronicznego były symetryczne jak i aby generator synchroniczny nie generował prądu biernego $i_{GVy} = 0$. Prądy generatora synchronicznego i_{GVa} są w fazie z napięciem wyjściowym u_{GVa} oraz występuje znacznie mniejsza asymetria prądów generatora.

Porównanie odpowiedzi klasycznego generatora oraz generatora w układzie Synchrogenvertera przedstawia Rys. 5.5.3 i Rys. 5.5.4. Obciążenie początkowe jest równe $0.2P_{GN}$ i $0.2Q_{GN}$, następnie w chwili czasowej t = 5.1s dołączane jest obciążenie asymetryczne takie, że faza a obciążona jest prądem równym 20% prądu znamionowego jednej fazy generatora, fazy b i c obciażone są prądem równym 60% prądu znamionowego jednej fazy generatora.. Rys. 5.5.3a przedstawia zmianę prędkości ω_{GV} podczas dołączenia oraz odłaczenia obciążenia asymetrycznego, odpowiedzi układu są podobne do zmian prędkości z Rys. 5.3.4a. Zmienia się jednak przebieg momentu elektromagnetycznego T_{eG} w generatorze klasycznym. Obciążenie niesymetryczne powoduje tętnienie mocy czynnej co przekłada się na tętnienia momentu T_{eG} . Zastosowanie układu Synchrogenvertera z układem regulacji jak na Rys. 5.5.1 umożliwia zmniejszenie tętnienia momentu T_{eGV} . Tętnienia w stanie ustalonym są równe dla układu Synchrogenvertera z magazynem energii $k_{BES} = 0.5$ oraz bez magazynu $k_{BES} = 0$. Tętnienia są zmniejszane kosztem tętnienia napięcia w układzie pośredniczącym prądu stałego u_{DC} . Tętnienia napięcia DC w przekształtniku powodują zadziałanie regulatora napięcia DC Rudc. W przypadku gdy dopuszczalne jest tętnienie napięcia DC niezbędne jest zastosowanie filtru środkowo zaporowego BSF o częstotliwości środkowej równej prądu czynnego przekształtnika. W przypadku obciążenia czestotliwości tetnień asymetrycznego tętnienia prądu mają częstotliwość 100Hz. W przypadku regulatora prądu biernego generatora synchronicznego Rigvy nie ma potrzeby stosowania dodatkowych filtrów ponieważ sam regulator Rigvy zmniejsza tętnienia prądu biernego generatora.

Porównanie przebiegów modułu napięcia generatora dla generatora klasycznego $|u_G|$ oraz dla generatora w układzie Synchrogenvertera $|u_{GV}|$ w przypadku zmiany obciążenia oraz obciążenia asymetrycznego przedstawia Rys. 5.5.4. Również w przypadku prądu wzbudzenia i_{fGV} jak i w przypadku modułu napięcia $|u_{GV}|$ układ Synchrogenvertera zmniejsza tętnienia pochodzące od obciążenia asymetrycznego.



Rys. 5.5.3 Porównanie odpowiedzi układu Synchrogenvertera i klasycznego generatora synchronicznego w przypadku zasilania obciążenia asymetrycznego, a) przebiegi prędkości generatora synchronicznego klasycznego ω_G , oraz prędkości generatora w układzie Synchrogenvertera ω_{GV} , b) przebiegi momentów elektromagnetycznych dla generatora klasycznego T_{eG} oraz generatora w układzie Synchrogenvertera T_{eGV} .



Rys. 5.5.4 Porównanie odpowiedzi układu Synchrogenvertera i klasycznego generatora synchronicznego w przypadku zasilania obciążenia asymetrycznego, a) przebiegi modułu napięcia wyjściowego generatora synchronicznego klasycznego $|u_G|$, oraz modułu napięcia generatora w układzie Synchrogenvertera $|u_{GV}|$, b) przebiegi prądów wzbudzenia generatora

dla generatora klasycznego i_{fG} oraz generatora w układzie Synchrogenvertera i_{fGV} .

Zasilanie obciążenia nieliniowego przez układ Synchrogenvertera umożliwia układ regulacji przekształtnika przedstawiony na Rys. 5.5.1. Przebiegi prądów i napięć Synchrogenvertera zasilającego prostownik 100kW przedstawiono na Rys. 5.5.5. W początkowej fazie układ obciążony jest odbiornikiem symetrycznym o mocy 20% obciążenia znamionowego generatora synchronicznego $0.2P_{GVN}$ i $0.2Q_{GVN}$ oraz prostownikiem

diodowym trójfazowym z dołączonym obciążeniem równym 100kW. Przebiegi prądów obciążenia i_{Loa} , i_{Lob} , i_{Loc} przedstawia Rys. 5.5.5b. Prądy generatora synchronicznego i_{GVa} , i_{GVb} , i_{GVc} przedstawia Rys. 5.5.5a. Prądy generatora synchronicznego są w fazie z napięciem wyjściowym u_{GVa} . Również prądy generatora posiadają mniejsze tętnienia niż prąd obciążenia. Tętnienia prądu prostownika diodowego są na tyle duże, że przekształtnik CV nie jest w stanie nadążyć zmianą prądu wyjściowego ze zmianą prądu obciążenia. Tym samym prądy generatora synchronicznego GV nie są sinusoidalne.



prostownika diodowego o mocy 100kW a) wartości chwilowe prądów generatora synchronicznego i_{GVa} , i_{GVb} , i_{GVc} oraz wartość chwilowa napięcia fazy a u_{GVa} , b) wartości chwilowe prądów obciążenia i_{Loa} , i_{Lob} , i_{Loc} oraz wartość chwilowa napięcia fazy a u_{GVa} .

Porównanie odpowiedzi klasycznego generatora synchronicznego jak i generatora w układzie Synchrogenvertera przedstawiono na Rys. 5.5.6 i Rys. 5.5.7. Układ Synchrogenvertera zmniejsza tętnienia momentu elektromagnetycznego T_{eGV} jak i tętnienia modułu napięcia wyjściowego $|u_{GV}|$ oraz tętnienia prądu wzbudzenia i_{fGV} . Układ nie ma możliwości zmniejszyć tętnień mocy czynnej do zera ponieważ prąd obciążenia posiada wyższe harmoniczne prądu od prostownika diodowego jak pokazano na Rys. 5.5.5.



Rys. 5.5.6 Porównanie odpowiedzi układu Synchrogenvertera i klasycznego generatora synchronicznego w przypadku zasilania prostownika diodowego 100kW, a) przebiegi prędkości generatora synchronicznego klasycznego ω_G , oraz prędkości generatora w układzie Synchrogenvertera ω_{GV} , b) przebiegi momentów elektromagnetycznych dla generatora klasycznego T_{eG} oraz generatora w układzie Synchrogenvertera T_{eGV} .





6. Współpraca układu Synchrogenvertera z siecią elektroenergetyczną

6.1 Metoda regulacji układu Synchrogenvertera współpracującego z siecią elektroenergetyczną

Podobnie jak klasyczny generator synchroniczny układ Synchrogenvertera można połączyć z siecią elektroenergetyczną SEE. Połączenie generatora z siecią jest szeroko opisane w literaturze [M4, L4, P5] z punktu widzenia np. stabilności generatora synchronicznego, kompensacji mocy biernej. Generator synchroniczny może być źródłem mocy czynnej i biernej. Podobnie przekształtnik pracujący na SEE może być źródłem mocy czynnej i biernej. W przypadku współpracy Synchrogenvertera z SEE niezbędne jest zastosowanie układu regulacji, który umożliwia zadawanie mocy czynnej i biernej generatora $p_{GV \ zad}$ i $q_{GV \ zad}$ jak i przekształtnika $p_{CV \ zad}$ i $q_{CV \ zad}$. Układ sieci SEE i Synchrogenvertera jest trójfazowy symetryczny zatem w stanie ustalonym można przyjąć że wartości chwilowej mocy czynnej i biernej odpowiadają wartościom mocy czynnej i biernej dostarczanej do sieci SEE [P6]. W układzie Synchrogenvertera moce poszczególnych elementów można wyznaczyć za pomocą wzorów od (4.1.6) do (4.1.11). Układ nadrzędny może zadawać moce bezpośrednio do generatora i przekształtnika lub zadawać moc wyjściową układu Synchrogenvertera. W przypadku zadawania mocy wyjściowej całego układu możliwe jest zastosowanie różnych algorytmów podziału mocy między przekształtnik CV i generator GV, tak, aby np. maksymalnie wykorzystać źródła odnawialne jak lub korzystać ze zwiększonej sprawności generatora GV i maszyny napędowej DE. Regulacja mocy czynnej i biernej w generatorze synchronicznym jak i w przekształtniku umożliwia dostarczenie większej mocy do obciążenia w zależności od zapotrzebowania.

Regulacja mocy czynnej generatora synchronicznego GV jak opisano w rozdziale 3.1 możliwa jest poprzez zmianę momentu napędowego T_m maszyny napędowej a regulacja mocy biernej poprzez zmianę prądu wzbudzenia i_{fG} . Regulacja przekształtnika CV możliwa jest uwzględniając zależności (4.1.10) i (4.1.11) poprzez zmianę prądu czynnego i_{CVx} w osi x lub prądu biernego i_{CVy} w osi y. Przykładowy wykres wektorowy dla przypadku zmiany zadanych wartości mocy czynnej i biernej przedstawia Rys. 6.1.1. W pracy układu na sieć elektroenergetyczną SEE przyjąć można stałe napięcie sieci o niezmiennych parametrach u_s . W początkowej fazie napięcie indukowane generatora jest zsynchronizowane z napięciem sieci $e_{GV0} = u_s$. Następnie zwiększono zadaną moc bierną przekształtnika q_{CV_zad} , co

spowodowało zwiększenie prądu biernego przekształtnika do wartości i_{CVI} . Zmiana prądu biernego przekształtnika nie powoduje zmiany napięcia indukowanego generatora $e_{GV0} = e_{GV1}$. Następnie zwiększyła się wartość mocy czynnej zadanej generatora synchronicznego $p_{GV zad}$, poprzez zwiększenie momentu napędowego T_m . Zmiana momentu napędowego T_m powoduje chwilową zmianę prędkości zgodnie z (2.2.1) co powoduje zwiększenie się kąta położenia wirnika do wartości δ_{GV2} . Różnica napięcia indukowanego generatora e_{GV2} i napięcia sieci u_S odłożona na reaktancji generatora powoduje przepływ prądu i_{GV2} . Przepływ prądu generatora i_{GV2} powoduje generację głównie mocy czynnej, lecz również mocy biernej. Generator pobiera moc bierną indukcyjną, zatem przekształtnik CV musi dostarczyć dodatkową moc bierną ($i_{CV3} > i_{CV2}$) do generatora GV, aby wyjściowa moc bierna była równa mocy zadanej $q_{CV} = q_{CV_{zad}}$. Zadana wartość mocy biernej generatora jest równa zero $q_{GV_{zad}} = 0$, zatem regulator mocy biernej generatora Rgqv zwiększa zadaną wartość prądu wzbudzenia tak, aby płynął jedynie prąd czynny w generatorze, czemu odpowiada prąd i_{GV3} i napięcie e_{GV3} . Prąd wyjściowy jest stały $i_{SGV2} = i_{SGV3}$ niezależnie od generowanej mocy biernej między przekształtnikiem CV i generatorem GV. Następnie zwiększona została zadana moc bierna przekształtnika $q_{CV zad}$, co zwiększyło prąd przekształtnika do wartości i_{CV4} i prąd wyjściowy do wartości i_{SGV4} bez zmian w prądu generatora $i_{GV4} = i_{GV3}$.



Rys. 6.1.1 Wykres wektorowy Synchrogenvertera współpracującego z SEE podczas regulacji prądu wyjściowego.

W celu zadawania mocy w układzie Synchrogenvertera niezbędna jest zmiana układu regulacji. Układ regulacji Synchrogenvertera z magazynem energii współpracującego z SEE przedstawia Rys. 6.1.2. W większości bloków jest on identyczny jak w przypadku regulacji autonomicznej. Różnice występują jedynie w regulatorach nadrzędnych maszyny napędowej, wzbudzenia, prądu biernego przekształtnika i prądu magazynu energii.



Rys. 6.1.2 Układ regulacji generatora synchronicznego, przekształtnika i magazynu energii w układzie Synchrogenvertera współpracującego z siecią elektroenergetyczną SEE.

Zadana moc czynna generatora p_{GV_zad} podawana jest na regulator Rpgv mocy czynnej, który zadaje wartość momentu mechanicznego T_m^* maszyny napędowej DE. Zadana moc bierna generatora q_{GV_zad} jest sygnałem wejściowym regulatora mocy biernej Rqgv, który zadaje odpowiednią wartość prądu wzbudzenia i_{fGV} . Dodatkowo zastosowano estymatory mocy generatora i przekształtnika T2. Moce chwilowe wyznaczane są ze wzorów przedstawionych w [A1, A2]

$$p_{GV} = u_{GV\alpha}i_{GV\alpha} + u_{GV\beta}i_{GV\beta} \tag{6.1.1}$$

$$q_{GV} = u_{GV\alpha} i_{GV\beta} - u_{GV\beta} i_{GV\alpha} \tag{6.1.2}$$

Gdzie: $u_{GV\alpha}$, $u_{GV\beta}$ – współrzędne wektora napięcia wyjściowego generatora we współrzędnych nieruchomych $\alpha\beta$, $i_{GV\alpha}$, $i_{GV\beta}$ – współrzędne wektora prądu wyjściowego generatora we współrzędnych nieruchomych $\alpha\beta$.

Z wartości zadanej mocy biernej przekształtnika q_{CV_zad} wyliczana jest wartość prądu przekształtnika i_{CVy} * = q_{CV_zad}/u_{GV} , która odpowiada mocy biernej zadanej zgodnie z (4.1.11). Moc czynna przekształtnika zawiera dodatkowo moc strat przekształtnika, dlatego nie może zostać wyznaczona moc czynna z (4.1.10). Aby moc wyjściowa była równa zadanej niezbędne jest dodanie różnicy mocy czynnej zadanej przekształtnika i mocy aktualnej $p_{CV} = p_{CV_zad}$ do zadanej wartości mocy czynnej generatora synchronicznego. Układ regulacji działa tak, że w przypadku zadanej mocy czynnej przekształtnika $p_{CV_zad} = 0$ nie jest zadawana wartość prądu magazynu energii.

$$p_{GV_{zad_mod}} = p_{GV_{zad}} + (p_{CV} - p_{CV_{zad}})$$
(6.1.3)

Gdzie: $p_{GV_{zad_mod}}$ – wartość zadana mocy generatora synchronicznego uwzględniająca straty przekształtnika.

Przebiegi mocy generowanych do sieci SEE przez układ Synchrogenvertera przedstawiono na Rys. 6.1.3. W początkowej fazie wszystkie zadane moce są równe zero. W chwili czasowej t = 2s zadawana jest moc czynna generatora synchronicznego równa mocy znamionowej generatora synchronicznego $p_{GV_{zad}} = 1P_{GN}$. Zmiana wartości zadanej nie powinna odbywać się skokowo zatem zastosowany jest filtr dolnoprzepustowy na wartość zadaną. Układ dostarcza moc czynną p_{GV} równą mocy czynnej zadanej. W chwili czasowej t = 6s zwiększona jest zadana wartość mocy biernej przekształtnika do wartości $q_{CV_{zad}} = 375$ kVar. Dostarczanie mocy biernej przez przekształtnik zwiększa straty w przekształtniku co powiększa moc czynną pobieraną przez przekształtnik p_{CV} .



Rys. 6.1.3 Przebiegi mocy a) czynnych i b) biernych generatora GV przekształtnika CV i SEE w układzie Synchrogenvertera współpracującego z SEE, c) prąd wzbudzenia generatora.

Układ regulacji powoduje zwiększenie mocy czynnej generatora o wartość różnicy mocy czynnej zadanej przekształtnika i mocy czynnej aktualnej tak aby moc czynna dostarczana do SEE była równa wartości zadanej mocy generatora synchronicznego $p_{SEE} = p_{GV_zad}$. W chwili czasowej t = 10s zwiększona jest moc czynna generatora synchronicznego do wartości $p_{GV_zad} = 1.25P_{GN} = 500$ kW . Generator synchroniczny GV może generować długotrwale, przy zerowej mocy biernej $q_{GV} = 0$ i zachowaniu prądu stajana na poziomie prądu zamionowego, maksymalnie wartość mocy czynnej równej 125% P_{GN} . Ponieważ nie ma możliwości dostarczenia większej mocy czynnej przez generator, moc generowana do SEE jest mniejsza od mocy zadanej o wartość mocy strat przekształtnika p_{CV} . Następnie w chwili czasowej t = 15s zadana jest moc czynna przekształtnika do wartości $p_{CV_zad} = 200$ kW.

Moc generowana w generatorze jest równa wartości zadanej p_{GV} = 500kW, moc dostarczana z przekształtnika jest równa $p_{CV zad}$ =200kW, co w sumie daje moc dostarczaną do SEE równą $p_{SEE} = 1.75 P_{GN} = 700 \text{kW}$. W chwili gdy niezbędna jest moc bierna większa niż moc bierna przekształtnika, jak w przypadku chwili czasowej t = 20s, zmniejszana jest moc czynna generowana pGV zad przez generator a zwiększana jest zadana moc bierna generatora $q_{GV \ zad}$. Moc bierna dostarczana do SEE jest równa sumie mocy biernej generowanej w generatorze synchronicznym q_{GV} = 300kVar i mocy biernej dostarczanej przez przekształtnik q_{CV} = 375kVar, co w sumie daje moc bierną SEE q_{SEE} = 675kVar. Prąd wzbudzenia generatora ifGV w każdym przypadku jest mniejszy lub równy prądowi znamionowemu uzwojenia wzbudzeni. Moc czynna generatora synchronicznego p_{GV} w każdym przypadku jest równa wartości zadanej, lub powiększona o wartość mocy strat przekształtnika. Moc bierna generatora synchronicznego p_{GV} jest równa wartości zadanej. W stanach przejściowych generator synchroniczny dostarcza niezerową moc bierną $q_{GV} = 0$, spowodowane jest to regulacją mocy czynnej przez maszynę napędową jak jest to opisane w rozdziale 3.1. Moc czynna przekształtnika p_{CV} jest równa mocy zadanej podczas gdy zadana jest niezerowa moc czynna $p_{CV zad} > 0$. W przypadku gdy moc czynna przekształtnika jest równa zero $p_{CV} \approx 0$ przekształtnik pobiera moc czynną równą mocy strat przekształtnika. Moc bierna przekształtnika p_{CV} jest w każdym przypadku równa mocy biernej zadanej.

Rys. 6.1.4 przedstawia przebiegi jednej fazy prądów generatora i_{GVa} , prądu przekształtnika i_{CVa} oraz prądu sieci SEE i_{SEEa} , oraz przebieg napięcia odpowiedniej fazy u_{GVa} . Przebiegi prądów są sinusoidalne. Prąd generatora synchronicznego jest w fazie z napięciem co oznacza że generator synchroniczny generuje jedynie moc czynną. Prąd przekształtnika jest przesunięty o kąt większy niż $\pi/2$ co oznacza że przekształtnik dostarcza mocy biernej oraz pobiera niewielką moc czynną potrzebną na pokrycie strat. Prąd SEE jest sumą prądów generatora GV i prądu przekształtnika CV.



Rys. 6.1.4 Przebiegi jednej fazy napięcia generatora u_{GVa} oraz prądów generatora i_{GVa} przekształtnika i_{CVa} i sieci i_{SEEa} w stanie gdy $p_{GV} = 1.25P_{GN}$, $q_{CV} = 1.25Q_{GN}$.

7. Podsumowanie i wnioski

Generatory synchroniczne są podstawowym źródłem mocy czynnej i biernej w elektrowniach, jak również w autonomicznych zespołach prądotwórczych. Charakteryzują się wysoką sprawnością podczas obciążenia znamionowego, sinusoidalnym napięciem wyjściowym oraz możliwością generacji mocy czynnej i biernej. Generator synchroniczny, pracujący autonomicznie, dostarcza napięcie o parametrach zależnych od wartości prędkości wału napędzającego oraz prądu wzbudzenia. Częstotliwość napięcia jest proporcjonalna do prędkości generatora a amplituda napięcia zależna od prądu wzbudzenia. Regulacja parametrów napięcia wyjściowego odbywa się ze stała czasową zależną od parametrów dynamicznych silnika napędowego oraz od stałej czasowej obwodu wzbudzenia. Oznacza to, że duże stałe czasowe układu napędowego oraz wzbudzenia nie pozwalają na regulację wartości chwilowych napięcia wytwarzanego w generatorze. Zależności te powodują znaczne zmiany parametrów generowanego napięcia, jak częstotliwość czy amplituda napięcia, które regulowane są na poziomie stałych czasowych wzbudzenia i maszyny napędzającej.

W rozprawie przedstawiono zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej, zwany Synchrogenverter [K3-K8], złożony z generatora synchronicznego, przekształtnika i magazynu energii ze wspólnym układem regulacji. W układzie Synchrogenvertera do wyjścia generatora synchronicznego dołączony jest równoległy przekształtnik, w którym na wejściu napięcia stałego dołączony jest magazyn energii. Oryginalność układu Synchrogenvertera potwierdzona jest dwoma patentami [K1, K2]. Zgłoszenia patentów wyprzedzają nawet firmę produkującą agregaty prądotwórcze na całym świecie [S3]. Synchrogenverter charakteryzuje się, w porównaniu z klasycznym generatorem synchronicznym, wysoką dynamiką odpowiedzi na zmianę obciążenia, dostarczaniem większej mocy na wyjściu układu, mniejszymi stratami w generatorze synchronicznym oraz większą stabilnością generatora synchronicznego.

Dołączenie zintegrowanego przekształtnika do wyjścia generatora synchronicznego daje możliwość dostarczenia szybkozmiennych prądów, przez przekształtnik, w przypadku zmiany obciążenia aby następnie z odpowiednią stałą czasową generator synchroniczny przejął generację mocy czynnej. W chwili zmiany obciążenia klasyczny generator synchroniczny reguluje wyjściowe napięcie oraz częstotliwość z dużymi stałymi czasowymi. Powoduje to podczas zmiany obciążenia znaczną zmianę napięcia wyjściowego oraz prędkości wału generatora synchronicznego. Układ regulacji przedstawiony w rozprawie

umożliwia dostarczenie szybkozmiennego prądu czynnego i biernego przez przekształtnik w celu stabilizacji prędkości, czyli częstotliwości napięcia, oraz prądu wzbudzenia, czyli amplitudy napięcia. Umożliwia następnie powolne przejęcie generowanej mocy czynnej przez generator synchroniczny.

Głównym założeniem układu regulacji Synchrogenvertera jest aby generator synchroniczny w stanie ustalonym nie generował mocy biernej. W klasycznym generatorze synchronicznym generacja mocy biernej powoduje ograniczenie generowanej mocy czynnej jak i zwiększenie prądu wzbudzenia. Zmniejszenie generowanej mocy biernej umożliwia dostarczenie większej mocy czynnej przez generator niż moc czynna znamionowa przy zachowaniu prądu stojana nie większego niż prąd znamionowy. W rozprawie określono wartość wyjściowej mocy układu Synchrogenvertera w dwóch przypadkach gdy wyjściowa moc bierna jest równa mocy biernej znamionowej generatora synchronicznego, oraz przy zachowaniu stałego współczynnika mocy $\cos \varphi_{GN}$. W zależności od zastosowanego magazynu energii zmienia się znamionowa moc czynna dostępna na wyjściu Synchrogenvertera. Dla magazynu energii o mocy długotrwałej równej 50% mocy znamionowej generatora synchronicznego możliwe jest zwiększenie mocy czynnej i biernej wyjściowej o 75% w stosunku do klasycznego generatora. Wykazano również że dla zastosowania samego przekształtnika moc wyjściowa zwiększa się o 25% w stosunku do klasycznego generatora synchronicznego. Badania komputerowe potwierdzają zwiększenie dostępnej mocy wyjściowej jednak moc wyjściowa jest mniejsza od wyliczonej. Spowodowane jest to stratami przekształtnika które pomniejszają nieznacznie dostępną moc.

Stabilność generatora synchronicznego zależna jest od zmian obciażenia, zmian momentu elektromagnetycznego hamującego wirnik, oraz zmian napięcia wyjściowego. Klasyczny generator synchroniczny jest niestabilny przy mniejszych wartościach prądu wzbudzenia [L4, M4, P5]. W przypadku układu Synchrogenvertera zmiany prądu obciążenia, czyli zmiany momentu elektromagnetycznego, pokrywane są poprzez dostarczanie mocy czynnej i biernej z przekształtnika i magazynu energii. Powoduje to stabilizację prędkości, zmniejszenie zmian momentu elektromagnetycznego oraz zmniejszenie zmian prądu wzbudzenia. W rozprawie przedstawiono analize zmian prędkości generatora synchronicznego W układzie Synchrogenvertera. Przedstawiony układ regulacji Synchrogenvertera pracującego autonomicznie reguluje prąd magazynu energii tak aby zminimalizować zmiany prędkości generatora synchronicznego. Badania komputerowe potwierdzają stabilizację prędkości i amplitudy wyjściowego napięcia. Dostarczenie szybkozmiennego prądu czynnego z magazynu energii powoduje zmniejszenie zmian

prędkości poniżej 1% przy zmianie obciążenia, również podczas rozruchu silnika indukcyjnego. Przejęcie mocy czynnej dostarczanej z magazynu energii przez generator synchroniczny następuje z regulowaną stałą czasową, zależną od stałych czasowych maszyny napędowej oraz od magazynu energii, co powoduje małe zmiany momentu elektromagnetycznego oraz małe zmiany prędkości generatora. W przypadku zmiany obciążenia generator synchroniczny nie generował mocy biernej co powodowało niedowzbudzenie generatora, lecz powolna zmiana momentu elektromagnetycznego zwiększa stabilność generatora niedowzbudzonego.

Pracę układu Synchrogenvertera można podzielić w zależności od mocy czynnej i biernej generowanej do obciążenia na pięć stanów pracy. Przedstawiono analizę poszczególnych stanów oraz korzyści wynikające z pracy układu w danym stanie. Każdy stan został przebadany w stanie ustalonym lub w stanie przejściowym Synchrogenvertera.

Stan pracy, w którym generator synchroniczny dostarcza mocy czynnej a przekształtnik mocy biernej, charakteryzuje się zwiększeniem dostępnej mocy wyjściowej o 25% w stosunku do klasycznego generatora synchronicznego. Stan ten występuje w przypadku gdy przekształtnik nie posiada magazynu energii lub w stanie ustalonym co przedstawiono w badaniach komputerowych. Z badań wynika również, że układ zapewnia większą niż w przypadku klasycznego generatora synchronicznego stabilizację napięcia wyjściowego podczas pracy autonomicznej, jak i zmniejsza wartość prądu wzbudzenia oraz straty związane z tym prądem. Jednak w tym stanie możliwe jest wystąpienie dodatkowych oscylacji spowodowanych zmniejszeniem prądu wzbudzenia generatora.

Stany pracy w których magazyn energii dostarcza lub pobiera moc czynną charakteryzują się wysoką dynamiką regulacji wyjściowego napięcia jak i stabilizacji prędkości generatora. Dostarczanie mocy czynnej z magazynu energii powiększa dodatkowo dostępną moc czynną nawet o 75% w porównaniu do klasycznego generatora synchronicznego. Badania potwierdzają możliwość dostarczenia mocy czynnej z generatora synchronicznego do momentu osiągnięcia wartości znamionowej prądu generatora a następnie dostarczenie dodatkowej mocy czynnej z magazynu energii. Stany te również występują podczas zmian obciążenia gdzie magazyn energii służy do tłumienia zmian prędkości. W stanach nieustalonych szybkozmienny prąd czynny dostarczany z przekształtnika umożliwia stabilizację wyjściowego napięcia i częstotliwości, poprzez stabilizację prędkości generatora synchronicznego.

Stan pracy w którym generator synchroniczny generuje moc czynną i bierną jest również możliwy. Układ regulacji posiada ograniczenia prądu wyjściowego przekształtnika,

co powoduje ograniczenia w dostarczanej mocy biernej. Jeśli obciążenie wymaga dostarczenia mocy biernej dużo większej niż dostępna moc przekształtnika generator synchroniczny może dostarczyć mocy biernej. Przykładem takiego obciążenia jest rozruch silnika indukcyjnego, który charakteryzuje się poborem dużego prądu biernego oraz szybkozmiennego prądu czynnego. W tym przypadku stosuje się dodatkowe przekształtniki lub agregaty o wyższych mocach znamionowych niż moc silnika synchronicznego tylko w celu rozruchu [S2]. Rozruch bezpośredni silnika indukcyjnego z generatora synchronicznego powoduje znaczne zmiany napięcia jak i prędkości. Przeprowadzono badania Synchrogenvertera podczas rozruchu bezpośredniego silnika indukcyjnego. Dostarczenie mocy czynnej i biernej przez przekształtnik podczas rozruchu umożliwia stabilizację prędkości jak i napięcia wyjściowego.

Zmniejszenie generowanej mocy biernej w generatorze synchronicznym wiąże się ze zmniejszeniem prądu wzbudzenia i prądu stojana. Oznacza to zmianę strat w wirniku i stojanie w generatorze synchronicznym podczas pracy w układzie Synchrogenvertera. Przeprowadzono analizę strat w generatorze synchronicznym w porównaniu do klasycznego generatora, co potwierdziło zmniejszenie strat w uzwojeniu stojana, w żelazie oraz w uzwojeniu wzbudzenia. Badania laboratoryjne potwierdzają zmniejszenie strat w generatorze synchronicznym. Układ Synchrogenvertera zmniejsza straty w generatorze synchronicznym co umożliwia zmniejszenie gabarytów maszyny lub powiększenie mocy wyjściowej bez konieczności stosowania skomplikowanych systemów chłodzenia.

Innym typem obciążenia jest obciążenie asymetryczne bądź nieliniowe. Obciążenia takie powodują tętnienia momentu elektromagnetycznego generatora i maszyny napędzającej jak i tętnienia prądu wzbudzenia. Opracowano układ regulacji do zasilania odbiorników asymetrycznych i nieliniowych powodujący zmniejszenie tętnień w generatorze synchronicznym. Badania układu regulacji przy obciążeniach asymetrycznych i nieliniowych potwierdziły zmniejszenie tętnienia momentu elektromagnetycznego, napięcia wyjściowego i prądu wzbudzenia przy zachowaniu stabilizacji prędkości i amplitudy napięcia.

W rozprawie przedstawiono układ regulacji chwilowych mocy czynnych i biernych Synchrogenvertera w przypadku współpracy w siecią elektroenergetyczną SEE. Podczas współpracy z SEE należy umożliwić zadawanie mocy czynnej i biernej wyjściowej. W układzie Synchrogenvertera należy zadać cztery wartości mocy, moce czynne generatora i magazynu energii oraz moce bierne generatora synchronicznego i przekształtnika. Układ regulacji umożliwia zadawanie wszystkich tych wartości. Moc czynna generowana do SEE przez generator synchroniczny jest nieznacznie mniejsza od mocy generowanej przez

generator. Spowodowane jest to pobieraniem pewnej mocy czynnej przez przekształtnik potrzebną do pokrycia strat. Przedstawiony układ regulacji zwiększa nieznacznie moc czynną generowaną przez generator synchroniczny aby moc czynna wyjściowa była równa zadanej. Badania komputerowe również przedstawiają stan w którym dostarczana moc czynna do SEE jest dużo większa od mocy znamionowej generatora. W przypadku zapotrzebowania na moc bierną możliwe jest generowanie mocy biernej przez generator synchroniczny i dostarczania z przekształtnika, co powoduje większą dostępną moc bierną wyjściową. Jednak generowanie mocy biernej przez generator synchroniczny zmniejsza moc czynna dostępną.

Do osiągnięć autora należą:

- opracowanie układu wytwarzania energii elektrycznej złożonego z generatora synchronicznego, przekształtnika energoelektronicznego i magazynu energii, zwanego Synchrogenverter,
- opracowanie układu regulacji zmniejszającego uchyby prędkości i napięcia generatora synchronicznego pracującego w układzie Synchrogenvertera w stosunku do układu klasycznego generatora synchronicznego w przypadku skokowych zmian mocy obciążenia,
- opracowanie układu regulacji dla obciążenia asymetrycznego i nieliniowego zmniejszający tętnienia momentu elektromagnetycznego generatora i prądu wzbudzenia generatora,
- opracowanie układu regulacji dla współpracy układu Synchrogenvertera z siecią elektroenergetyczną z możliwością zadawania mocy czynnej i biernej w generatorze synchronicznym i przekształtniku,
- opracowanie modeli komputerowych generatora synchronicznego, przekształtnika i magazynu energii w celu przeprowadzenia badań układu regulacji,
- analiza strat w generatorze synchronicznym pracującym w układzie Synchrogenvertera,
- analiza znamionowej mocy generowanej do obciążenia w układzie Synchrogenvertera z uwzględnieniem mocy magazynu energii i wyjściowej mocy biernej,
- analiza i badania komputerowe układu Synchrogenvertera.

Załączniki

A.1. Parametry podzespołów

 Tabela A.1.1 Parametry modelu generatora synchronicznego

Symbol	Wartość	Opis		
<i>u</i> _G	565V	Amplituda napięcia przewodowego generatora		
R_S	8mΩ	Rezystancja uzwojenia stojana		
L _S	40.4µH	Indukcyjność rozproszenia uzwojenia stojana		
L _{md}	2.7mH	Indukcyjność magnesowania w osi d		
L_{mq}	2.2mH	Indukcyjność magnesowania w osi q		
R_f	1.3mΩ	Rezystancja uzwojenia wzbudzenia		
L _{fo}	104.9µH	Indukcyjność rozproszenia uzwojenia wzbudzenia		
R_D	15mΩ	Rezystancja uzwojenia tłumiącego w osi d		
$L_{D\sigma}$	151.5µH	Indukcyjność rozproszenia uzwojenia tłumiącego w osi d		
R _Q	11mΩ	Rezystancja uzwojenia tłumiącego w osi q		
L _{Qσ}	234.6µН	Indukcyjność rozproszenia uzwojenia tłumiącego w osi q		
L_0	57.9µH	Indukcyjność zerowa		
р	2	Ilość par biegunów		
J_g	4.003kg m^2	Moment bezwładności		
n	1500obr/min	Znamionowa prędkość		
S_{GN}	500kVA	Znamionowa moc pozorna		
P_{GN}	400kW	Znamionowa moc czynna		
Q_{GN}	300kVar	Znamionowa moc bierna		
$cos \varphi_{GN}$	0.8	Znamionowy współczynnik mocy		
I_{fN}	135A	Znamionowy prąd wzbudzenia		

Tabela	A.1.2	Parametry	modelu	symulacyjnego	oraz	parametry	sieci	elektroenergetycz	nej
SEE w	prograi	mie PSIM							

Symbol	Wartość	Opis
f_S	10kHz	Częstotliwość PWM przełączenia tranzystorów
us	3x400V	Napięcie przewodowe sieci elektroenergetycznej
R_{SEE}	lmΩ	Rezystancja sieci elektroenergetycznej
L_{SEE}	5μН	Indukcyjność sieci elektroenergetycznej

Symbol	Wartość	Opis			
R_{CV}	5mΩ	Rezystancja dławika wyjściowego przekształtnika			
L_{CV}	0.5mH	Indukcyjność dławika wyjściowego przekształtnika			
C _{CV}	20mF	Pojemność kondensatorów obwodu pośredniczącego przekształtnika			
L_{CV}	0.5mH	Indukcyjność dławika wyjściowego przekształtnika			
L _{Balans}	0.1mH	Indukcyjność dławika w układzie balansującym napięcia kondensatorów przekształtnika			

Tabela A.1.3 Parametry modelu symulacyjnego przekształtnika CV

Tabela A.1.4 Parametry modelu symulacyjnego magazynu energii BES

Symbol	Wartość	Opis
C_{BES}	100F	Pojemność magazynu energii
L _{BES}	1mH	Indukcyjność dławika w przekształtniku magazynu energii
R_{BES}	0.1mΩ	Rezystancja wewnętrzna magazynu energii

Tabela A.1.5 Parametry modelu silnika indukcyjnego

Symbol	Wartość	Opis
R _{IMS}	40mΩ	Rezystancja uzwojenia stojana
L _{IMS}	0.36mH	Indukcyjność rozproszenia uzwojenia stojana
R _{IMr}	51.6mΩ	Rezystancja twornika
L _{IMr}	0.74mH	Indukcyjność rozproszenia wirnika
L _{IMm}	16mH	Indukcyjność magnesująca
p_{IM}	4	Ilość par biegunów
J_{IM}	10kg m ²	Moment bezwładności
n _{IM}	1442obr/min	Znamionowa prędkość
P _{IMN}	100kW	Znamionowa moc czynna
$cos \varphi_{IMN}$	0.83	Znamionowy współczynnik mocy
T _{IMN}	636Nm	Znamionowy moment silnika

Symbol	Wartość	Opis
T_{2PS}	1	Stała czasowa członu różniczkującego PSS
T _{3PS}	0	Stała czasowa członu korekcyjnego PSS
T_{4PS}	0.016	Stała czasowa członu korekcyjnego PSS
T_{5PS} , T_{6PS}	30	Stałe czasowa członu korekcyjnego PSS
k_P	0.5	Wzmocnieni bloku PSS
U _{PSS_max}	0.02	Ograniczenie wartości maksymalnej
U _{PSS_min}	-0.02	Ograniczenie wartości minimalnej

 Tabela A.1.6 Parametry stabilizatora systemowego PSS

Literatura

- [1] "Renewables 2018 Global Status Report", ISBN 978-3-9818911-3-3
- [2] IEEE Standard Association "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", IEEE Std 421.5TM-2016
- [3] "Turbine-Governor Models Standard Dynamic Turbine-Governor Systems in NEPLAN Power System Analysis Tool", Neplan Smarter tools.
- [4] Stamford power generation, "HCI 534D544D Technical Data Sheet", Karta katalogowa generatora synchronicznego.
- [A1] João L. Afonso, M. J. Sepúlveda Freitas, and Júlio S. Martins, "p-q Theory Power Components Calculations", 2003 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Brazil, DOI: 10.1109/ISIE.2003.1267279
- [A2] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A.: "Generalized theory of the instantaneous reactive power in three phase circuits", IPEC'83, Tokyo, s.1375-1386
- [C1] A. Chakraborty, S. K. Musunuri, A. K. Srivastava, and A. K. Kondabathini, "Integrating STATCOM and Battery Energy Storage System for Power System Transient Stability: A Review and Application", Hindawi Publishing Corporation Advances in Power Electronics Volume 2012, doi:10.1155/2012/676010
- [C2] A. Cuculić, J. Ćelić, R. Prenc, "Marine Diesel-generator Model for Voltage and Frequency Variation Analysis During Fault Scenarios", Pomorski zbornik 51 (2016), DOI: 10.18048/2016.51.01
- [C3] S. Chakraborty, W.E. Kramer, M. G. Simoes "Power Electronics for Renewable and Distributed Energy Systems": A Sourcebook of Topologies, Control and Integration Springer Verlag, London 2013, DOI 10.1007/978-1-4471-5104-3
- [C4] R. R. Chilipi, Bhim Singh, S. S. Murthy, "Performance of a Self-Excited Induction Generator With DSTATCOM-DTC Drive-Based Voltage and Frequency Controller", IEEE Transactions On Energy Conversion, Vol. 29, No. 3, September 2014
- [D1] Jiaojiao Dong, Feng Gao, Xiaohong Guan, Qiaozhu Zhai, and Jiang Wu, "Storage Sizing With Peak-Shaving Policy for Wind Farm Based on Cyclic Markov Chain Model", IEEE Transactions On Sustainable Energy, VOL. 8, NO. 3, JULY 2017, DOI: 10.1109/TSTE.2016.2637916

- [E1] Navid Eghtedarpour, Ebrahim Farjah, "Distributed charge/discharge control of energy storages in a renewable-energy-based DC micro-grid", IET Renewable Power Generation, January 2014, doi: 10.1049/iet-rpg.2012.0112.
- [G1] Gopinath S., "Effectiveness of Auxiliary system monitoring & Continuous Hydrogen Scavenging Operation on Hydrogen-cooled Generator at Power Plant", Proceedings of ICEE 2009 3rd International Conference on Energy and Environment, 7-8 December 2009, Malacca, Malaysia, DOI: 10.1109/ICEENVIRON.2009.5398654.
- [H1] M. Hyla, "Wyznaczanie zakresu regulacji mocy biernej silnika z biegunami jawnymi na podstawie pomiarów stanu pracy synchronicznej", Mining – Informatics, Automation 82 and Electrical Engineering.
- [I1] Grzegorz Iwanski, Pawel Staniak, Włodzimierz Koczara, "Power Management in a DC Microgrid Supported by Energy Storage", 2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, DOI: 10.1109/ISIE.2011.5984183.
- [K9] A-Rong Kim, Kwang-Min Kim, Heecheol Park, Gyeong-Hun Kim, Tae-Joon Park, Minwon Park,Seokho Kim, Sangjin Lee, Hongsoo Ha, Sangwon Yoon, and Hunju Lee, "Performance Analysis of a 10-kW Superconducting Synchronous Generator", IEEE Transactions On Applied Superconductivity, Vol. 25, No. 3, June 2015, DOI: 10.1109/TASC.2014.2381000.
- [K10] R. Krok, M. Pasko, "Nowe życie pracujących turbogeneratorów", Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 93 nr. 2/2017 doi:10.15199/48.2017.02.20
- [L1] Weilin Li, Xiaobin Zhang, Huimin Li, "A Novel Digital Automatic Voltage Regulator for Synchronous Generator", 2010 International Conference on Power System Technology, DOI: 10.1109/POWERCON.2010.5666631.
- [L2] TingAn Lee, Masahiro Kinoshita, Kazunori Sanada, "High-Efficiency Large-Capacity Uninterruptible Power Supply Using Bidirectional-Switch-Based NPC Multilevel Converter", 8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia, IEEE 2011, DOI: 10.1109/ICPE.2011.5944525.
- [L3] Dong-Hee Lee, Tae-Hyoung Kim and Jin-Woo Ahn, "Control of Digital AVR in Stand Alone Generator for Improved Dynamic Characteristics", Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008, DOI: 10.1109/PESC.2008.4592233.
- [L4] W. Latek, R. Matla, W, Pełczewski, M. Pluciński, K. Radziwił, K. Wołkowiński, Z. Woynarowski, "Teoria Maszyn Elektrycznych", Wydawnictwa naukowo techniczne, Warszawa 1987.

- [L5] A. Lange, M. Pasko, "Wpływ pieców łukowych na krótkotrwały (Pst) i długotrwały
 (Plt) współczynnik migotania światła", Przegląd Elektrotechniczny nr. 4/2016, doi:10.15199/48.2016.04.31
- [M1] J. Machowski, S. Robak, J. W. Bialek, J. R. Bumby, and N. Abi-Samra, "Decentralized Stability-Enhancing Control of Synchronous Generator", IEEE Transactions On Power Systems, Vol. 15, No. 4, November 2000, DOI: 10.1109/59.898110.
- [M2] Ahmed A. Mohamed, Mohamed Elshaer, Osama A. Mohammed: "Reactive Power Compensation Control for Stand - Alone Synchronous Generator-Based Wind Energy Conversion System", IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, DOI: 10.1109/IECON.2010.5675052.
- [M3] Henryk MARKIEWICZ, Antoni KLAJN, "Wpływ zmian parametrów określających jakość energii elektrycznej na pracę odbiorów", PCPM nr 02/03/2001, Wrocław 2001.
- [M4] J. Machowski, "Regulacja i stabilność system elektroenergetycznego", Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007,
- [P1] Sang-Hoon Park, Jae-Sung Yu, Sang-Seuk Lee, Su-Won Lee, Chung-Yuen Won, "Output Voltage Control of Synchronous Generator for Ships using a PMG Type digital AVR", 2009 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, DOI: 10.1109/ECCE.2009.5316195.
- [P2] Sang Luigi Piegari, Renato Rizzo, Pietro Tricoli, "A simple configuration and control system for grid connected synchronous generators", 2007 Compatibility in Power Electronics, DOI: 10.1109/CPE.2007.4296500.
- [P3] Shuthakini Pulendran, and Joseph Euzebe Tate, "Energy Storage System Control for Prevention of Transient Under-Frequency Load Shedding", IEEE Transactions On Smart Grid, Vol. 8, No. 2, March 2017, Doi: 10.1109/Tsg.2015.2476963.
- [P4] Tomasz Pakulski, Bogdan Czarnecki, "Strategie wykorzystania zasobników energii oraz odnoszone korzyści", Instytut Energetyki Instytut Badawczy Oddział Gdańsk.
- [P5] A. Plamitzer, "Maszyny elektryczne" Wydawnictwo Naukowo Techniczne, Warszawa 1982.
- [P6] M. Pasko, M. Maciążek, "Teoria mocy p-q poprawna teoria czy użyteczny algorytm sterowania kompensatorów kluczujących", Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 82 Nr 6/2006.

- [R1] Jacek Rabkowski, Dimosthenis Peftitsis, and Hans-Peter Nee, "Design Steps Toward a 40-kVA SiC JFET Inverter With Natural-Convection Cooling and an Efficiency Exceeding 99.5%", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 49, No. 4, 15 April 2013, DOI: 10.1109/TIA.2013.2258132.
- [S1] Tianchai Suksri, Sompong Srilad, Satean Tunyasrirut, "Reactive Power and Voltage of a Synchronous Generator Control by Using T-DOF Controller", SICE Annual Conference, 2008, DOI: 10.1109/SICE.2008.4654758.
- [S2] Zbigniew Szulc, Krzysztof Fałdyga, "Zastosowanie agregatu prądotwórczego i przemiennika częstotliwości do rozruchu silnika pompy wody zasilającej w warunkach awarii katastrofalnej", Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 74/2006
- [S3] Seliga Robert, Ernest Emil, Paciura Krzysztof, Brown Neil, "Power generation system", Wynalazek, Patent, Numer patentu WO 2015/150740, Data zgłoszenia: 04.04.2014
- [T1] Tępiński J.: Rozprawa doktorska "Układ generatora indukcyjnego z aktywnym kompensatorem przekształtnikowym" Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej 2015
- [X1] Lie Xu, and Dong Chen, "Control and Operation of a DC Microgrid With Variable Generation and Energy Storage", IEEE Transactions On Power Delivery, Vol. 26, No. 4, October 2011 Doi:10.1109/Tpwrd.2011.2158456
- [Z1] Katarzyna Zalewska Tomaszewska, Waldemar Rebizant, "Testing of the FDC based Excitation Current Regulator", Modern Electric Power Systems 2010, Wroclaw, Poland

Patenty układu wytwarzania energii "Synchrogenverter":

- [K1] Koczara Włodzimierz, Szulawski Piotr, Wiśniewski Janusz: "Układ wytwarzania energii elektrycznej", Wynalazek, Patent przyznany, Numer patentu: PAT.223277, Data otrzymania patentu: 16.12.2015, Data zgłoszenia: 20.07.2012.
- [K2] Koczara Włodzimierz, Szulawski Piotr: "Układ wytwarzania energii elektrycznej z magazynem energii", Wynalazek, Patent przyznany, Numer patentu: PAT.229518, Data otrzymania patentu: 16.03.2018, Data zgłoszenia: 15.01.2014

Artykuły i referaty:

- [K3] W. Koczara, P. Szulawski, "Synchrogenverter Hybrid generation system," 2015
 IEEE 5th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), Riga, 2015, pp. 521-526. doi: 10.1109/PowerEng.2015.7266371
- [K4] W. Koczara, P. Szulawski, "Synchrogenverter Novel Hybrid Generator", Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberga, Niemcy, 2015, pp. 1-8.
- [K5] W. Koczara, P. Szulawski, "Synchrogenverter Hybrid generation system", 2015
 Tenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), Monte Carlo, 2015, pp. 1-7. doi: 10.1109/EVER.2015.7113025
- [K6] W. Koczara, P. Szulawski, "Synchrogenverter parallel connection of synchronous generator and power converter with energy storage", Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym (SENE 2015), Łódź, Polska, 2015.
- [K7] W. Koczara, P. Szulawski "Zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym", Przegląd Elektrotechniczny, 2014, pp. 1-7. doi:10.12915/pe.2014.08.01
- [K8] W. Koczara, P. Szulawski " Synchrogenverter parallel connection of synchronous generator and power converter with energy storage", Power electronics and drives, 2016, Vol. 1(36), No. 1, 2016, pp. 69-78, doi: 10.5277/PED160105