

Dr hab. inż. Henryk Kocot  
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów  
Wydział Elektryczny Politechniki Śląskiej  
[Henryk.Kocot@polsl.pl](mailto:Henryk.Kocot@polsl.pl)  
Tel. 32 237 26 40

Gliwice, 8 marca 2017 r.

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

mgr. inż. Mariusza Radwańskiego

**pt. „Dobór nastawień przekładni poprzecznych oraz adaptacyjne dostosowywanie (w stanach quasi-ustalonych) obszarów regulacji grup przesuwników fazowych w SEE”**

### **1. Podstawa opracowania recenzji**

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest uchwała Rady Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej z dnia 18 stycznia 2017 r. oraz pismo Dziekana Wydziału Elektrycznego Politechniki Warszawskiej Pana prof. dr hab. inż. Lecha Grzesiaka z dnia 24 stycznia 2017 r.

### **2. Tematyka, tezy i cel rozprawy**

Obecna struktura połączonego europejskiego systemu elektroenergetycznego oraz rozkład generacji pomiędzy, jak i wewnątrz poszczególnych jego części sprawiają, że systematycznie obserwuje się występowanie nieplanowanych przepływów wyrównawczych między poszczególnymi obszarami systemu. Problem ten jest bardzo widoczny w regionie Europy Centralnej. Przepływy te mogą wykorzystywać znaczącą część termicznych zdolności przesyłowych połączeń transgranicznych, ograniczając tym samym ilości mocy przesyłowych udostępnianych uczestnikom rynku zainteresowanym międzysystemowym handlem energią. Dodatkowo, ze względu na swój charakter, mogą one prowadzić do pogorszenia się poziomu bezpieczeństwa pracy poszczególnych systemów.

Jednym z możliwych sposobów pozwalających na ograniczenie niepożądanych przepływów wyrównawczych jest stosowanie tzw. przesuwników fazowych (PF), tj. transformatorów z regulacją poprzeczną (regulacją kąta). Obecnie w Europie pracuje znaczna liczba takich układów, w tym również na liniach wymiany polsko-niemieckiej wychodzących z stacji Mikułowa, a w najbliższej przyszłości także z stacji Krajnik. Przynależność układów regulacyjnych do różnych operatorów, a tym samym obowiązek prowadzenia regulacji przez

nich, stwarza konieczność prowadzenia szerokich analiz oddziaływania tych układów na system własny, ale i systemy sąsiednich operatorów. Nieskoordynowana regulacja PF przez sąsiednich operatorów może powodować, że żaden z nich nie osiągnie własnego celu.

Z tego powodu uważam, że tematyka pracy jest niezwykle ważna i aktualna, zarówno od strony naukowej jak i użytecznej.

Autor rozprawy formułuje trzy tezy. Są one dosyć rozbudowane, głównie ze względu na jednoczesny objaśniający ich charakter. Duchem tych tez wydaje się być stwierdzenie, że *możliwe jest opracowanie jednolitej, aczkolwiek otwartej na rozszerzenia, funkcji celu, zawierającej odpowiednio dobrane składniki i ich wagi tak, aby możliwe było, przez odpowiedni dobór nastaw kątów PF optymalizujący tę funkcję, osiągnięcie zadowalającego kompromisu dla wszystkich stron.*

Zgodnie z tezami, celem Autora jest opracowanie metod, które będą narzędziem wsparcia operatorów przy realizacji określonych funkcji kryterialnych oraz prowadzeniu procesów decyzyjnych związanych z pracą przesuwników fazowych.

Tak postawione tezy i cel pracy stanowią ważne, aczkolwiek niełatwe zadanie przed którym stanął Autor rozprawy.

### **3. Ogólna ocena rozprawy**

Opiniowana rozprawa zawiera 151 stron tekstu wraz z ilustracjami, wzorami oraz spisem literatury obejmującym 174 pozycji. Uzupełniona jest dwoma załącznikami, które w moim odczuciu stanowią ważną część pracy. Całość dokumentu liczy 166 stron.

W celu zrealizowania założonego celu i udowodnienia postawionych tez, autor przedstawił tematykę rozprawy w dwóch częściach.

Część pierwszą obejmującą rozdziały 2-6 można nazwać częścią przeglądową, systematyzującą wiadomości dotyczące obowiązujących na świecie uwarunkowań międzysystemowych (międzyoperatorskich), metod i urządzeń do regulacji mocy czynnej oraz zjawisk fizycznych i ograniczeń technicznych wpływających na międzysystemowe przepływy mocy. Materiał związany z powyższymi problemami jest bardzo obszerny i dlatego odpowiedni wybór i sposób jego przedstawienia tak, aby nie naruszyć odpowiednich proporcji w rozprawie i nie przekroczyć rozsądnej objętości dokumentu, stanowić mogło znaczący trudność. Moim zdaniem Autor dobrze wybrnął z tej trudności, przedstawiając najważniejsze elementy z punktu widzenia drugiej, zasadniczej części rozprawy.

Druga część rozprawy, obejmująca rozdziały 7-14 i uzupełniona załącznikami A i B, przedstawia wyniki badań własnych Autora, definiujące różne wskaźniki docelowej funkcji kryterialnej oraz sposoby ich wyznaczania, łącznie z ich praktyczną analizą w sieci testowej, przy pomocy autorskiego oprogramowania.

Przed przystąpieniem do analizy zaproponowanych wskaźników Autor przedstawia podstawy matematyczne wykorzystanej do obliczeń metody wrażliwości oraz dokonuje

sprawdzenia terytorialnego oddziaływania PF zainstalowanych w gałęziach międzysystemowych poprzez określenie dopuszczalnych i niezalecanych obszarów regulacji.

W kolejnych rozdziałach tej części Autor skupia się na wybranym wskaźniku opisującym pracę sieci i tak są to:

- zapas przepustowości mocy gałęziowych, z rozróżnieniem normalnego stanu pracy systemu oraz stanu N-1,
- wskaźnik wykorzystania elementów infrastruktury elektroenergetycznej (gałęzi), w tym również wykorzystania elementów jednego systemu przez inny system z nim połączony,
- wskaźniki kosztów związanych z wykorzystaniem elementów infrastruktury elektroenergetycznej w ujęciu kosztów stałych oraz podziału na część zajętą i rezerwową przekroju przesyłowego,
- współczynniki należności z tytułu zmiany stopnia wykorzystania przekrojów przesyłowych.

Po dokonaniu analizy poszczególnych wskaźników określona została postać złożonej funkcji kryterialnej wykorzystująca zdefiniowane kategorie wskaźników oraz przedstawione zostały przykładowe scenariusze realizacji funkcji kryterialnych dla poszczególnych SEE.

Całość przeprowadzonych badań Doktorant podsumowuje w rozdziale 15, w którym prezentuje szereg wniosków wynikających z pracy m.in., że PF są urządzeniami, które pozwalają w silny sposób zmienić proporcje mocy w poszczególnych gałęziach; oddziaływanie PF na SEE może rozciągać się na gałęzi znacznie oddalone, lecz najsilniejsze jest w najbardziej zwartych oczkach sieciowych; PF oddziałują na siebie, czasami „sumując” swoje działanie lub redukując (kompensując) nawet do zera; ważna jest koordynacja współpracy poszczególnych operatorów zarządzających poszczególnymi PF; dobierając odpowiednie nastawienia PF można maksymalizować zapas przepustowości gałęzi systemu oraz można minimalizować drogę przepływu mocy przez obszar danego systemu, do którego należą urządzenia lub systemów sąsiednich (regulacja daje znaczące efekty zarówno w normalnym stanie pracy, jak też w stanie N-1).

Doktorant wykazał również, że istnieje możliwość określenia wpływu regulacji na SEE poprzez obliczenie współczynników średniego zapasu przepustowości gałęzi systemu. Dodatkowo zmiany powstałe w SEE na skutek wykorzystania określonych tras przekrojów przesyłowych można opisać stosując współczynnik należności z tytułu zmian MW-km.

Dokonując oceny tej części pracy należy stwierdzić, że Doktorant posługuje się zlinearyzowanym rozplływem mocy, co dla tego typu analiz jest uproszczeniem jak najbardziej uzasadnionym. Linearyzacja rozplwywu umożliwiła wykorzystanie dla celów optymalizacyjnych programowania liniowego, co ułatwia obliczenia, a także daje szerokie możliwości interpretacyjne wyników. Wykorzystanie uproszczonego rozplwywu mocy pozwoliło również bezpośrednio wykorzystać, raz wyznaczone wskaźniki wrażliwości (dla pełnej sieci), do oceny stanów N-1. Zaproponowane przez Dyplomanta funkcje celu można podzielić na typowo techniczne (zapas przepustowości gałęzi), techniczno-ekonomiczne

(wykorzystanie metody MW-km), czy ekonomiczne (koszty godzinowe infrastruktury sieciowej). Wykorzystanie tych, różnego typu wskaźników, pokazuje szerokie spojrzenie na rozwiązywany problem przez Doktoranta. Należy tu też zwrócić uwagę na korzystanie z dorobku naukowców z Politechniki Warszawskiej (głównie Promotora) w zakresie propagowania metody śledzenia rozplływów mocy. Na uwagę zasługuje także samodzielnie wykonane oprogramowanie rozwiązujące poszczególne problemy cząstkowe (załącznik B).

Podsumowując, ogólna ocena rozprawy jest w moim odczuciu bardzo pozytywna.

#### **4. Uwagi dyskusyjne i komentarze**

Uwagi dyskusyjne zostały podzielone na dwie grupy: pierwsza związana z redakcją rozprawy i druga dotycząca szerszych aspektów merytorycznych.

##### Redakcja rozprawy

1. Na str. 14 rozprawy Autor zamieścił zbiór założeń przyjętych w całej rozprawie. W punkcie 5 podaje, że „*W sieciach prądu przemiennego występuje typowa silna zależność napięcia i mocy biernej...*”, przy czym jest to prawda dla sieci o dużym stosunku X/R, a nie dla wszystkich sieci prądu przemiennego.

2. Nie zawsze odwołania do literatury są zgrabnie ujęte np. na str. 30 po pierwszym zdaniu w punkcie 3.1. „*Metoda regulacji kąta obciążenia może być stosowana dla konfiguracji sieci pracującej w układzie oczkowym*” jest odwołanie aż do 35 pozycji literaturowych. Twierdzenie to nie wymaga chyba, aż takiej dokumentacji. Natomiast brak jest na przykład jakiegokolwiek odwołania przy powoływaniu się na wykonanie obliczeń wstępnych (rozplływów mocy i współczynników wrażliwości) z wykorzystaniem programu SENSIT, a nie jest to z pewnością program powszechnie znany i używany w środowisku elektryków.

3. Od str. 75 Autor stosuje oznaczenie  $\mathbf{W}$  dla wektora zespolonych mocy gałęziowych (zależność 8.11), natomiast od str. 79 jest to już tylko moc czynna (co wynika z zastosowanej metody) – pozostaje jednak to samo oznaczenie. Autor co prawda podaje pod zależnością 9.1, że  $\mathbf{W}^0$  jest to moc gałęzi w stanie bazowym ograniczona do mocy czynnej, ale warto było w tym miejscu zrobić nieco szerszy komentarz w tej sprawie. Wzór 9.1 nie przedstawia zmiany mocy gałęziowych, a raczej nowe moce w gałęziach po zmianie kątów - wystąpi konflikt w wzorach 9.1 i 9.3. Nie jest też jasno sprecyzowana wielkość  $\mathbf{W}^M$  – maksymalna dopuszczalna moc gałęzi (ograniczona do mocy czynnej). W jaki sposób Autor zmieniał moc dopuszczalną (moc pozorną wynikająca z prądu dopuszczalnego gałęzi) na moc dopuszczalną czynną ?

4. Od str. 102 (zależność 11.3) pojawiają się przy niektórych macierzach specyficzne indeksy „\” np.  $\Delta\theta\setminus$ . Brak wyjaśnienia tych oznaczeń utrudnia analizę kolejnych zależności (analizując kolejne przekształcenia można dojść do wyjaśnienia tego indeksu).

5. W opisie zmodyfikowanego modelu IEEE118, który przyjęty był do obliczeń testowych, Autor nie podaje wartości jakie przyjmował dla obciążalności poszczególnych

gałęzi (wartości te można znaleźć w wydruku programu TCPST\_main), a także brak informacji o przyjętych długościach tych gałęzi (te czytane są z „zewnątrz” w programie TCPST\_input), które były niezbędne w metodzie MW-km. Jakie wartości tych parametrów Autor przyjmował do obliczeń ?

6. Wyniki optymalizacji podaje Autor zwykle w postaci wykresów zmian przepływów gałęziowych (np. maksymalizacja zapasu przepustowości rys. 10.1-10.10). W tym przypadku taka prezentacja wydaje się być wystarczająca. W przypadku metody wykorzystującej równoczesną minimalizację drogi przepływu (rozdział 11) składnikiem funkcji celu jest też sumaryczna wartość MW-km. W tym przypadku warto było pokazać też zmiany tej wielkości w poszczególnych analizowanych przypadkach.

#### Uwagi merytoryczne

7. Podstawową metodą związaną z rozptyłami mocy stosowaną w rozprawie jest metoda wrażliwości oraz niezależności rozptyłu mocy czynnej i biernej (nazywana w literaturze metodą stałoprądową). Czy Autor dokonał sprawdzenia poprawności zastosowania tej metody w rozważanej sieci ? Metoda wrażliwości jest zawsze słuszna, jak zresztą podaje Autor (str. 76) w bliskim otoczeniu stanu bazowego. Otrzymane nastawy PF osiągają wartości 20 stopni, a zmiany mocy w niektórych gałęziach są bardzo duże (np. rys. 10.1). Czy to jeszcze jest bliskie otoczenie stanu bazowego ? Czy Autor sprawdzał obliczenia rozptyłów mocy wyznaczone metodą stałoprądową metodą dokładną ?

8. W zastosowanej metodzie kompensacyjnej dla stanów N-1 Autor podaje wzór 10.12 na wartość kąta wirtualnego PF umieszczonego w wyłączanej gałęzi. Czy w czasie obliczeń – zmian nastaw rzeczywistych PF, mających za zadanie maksymalizację zapasu przepustowości w stanach N-1 (tabela 10.5) wartość tego kąta była stała (dla danego wyłączenia), tak jak wynika ze wzoru 10.12 ?

9. Maksymalizowana funkcja celu w metodzie wykorzystania nastawień PF do przeciwdziałania nadmiernemu wykorzystaniu gałęzi jednego z systemów przez inny system z nim połączony, jest różnicą zapasu przepustowości  $\epsilon$  oraz iloczynów udziałów odbiorów jednego systemu w przepływach gałęziowych drugiego systemu  $\Omega$  i długości tych gałęzi. Abstrahując od jednostek tych składników, pytanie dotyczy udziału tych składników w funkcji celu i tym samym otrzymanego rozwiązania (patrz również punkt 6 uwag). Patrząc na wyniki optymalizacji  $\epsilon$  zmienia się o kilkanaście MW, zaś można sądzić, że nawet przy małych udziałach odbiorców jednego systemu w gałęziach drugiego systemu, po przemnożeniu tych udziałów przez długości linii wartość sumaryczna tego składnika znacznie przewyższy zmiany  $\epsilon$ , a stąd wątpliwość czy jest sens uwzględniać  $\epsilon$  w funkcji celu. Czy nie należałoby w funkcji celu pomnożyć  $\epsilon$  przez sumaryczną długość podsystemu badanego ?

10. Na str. 63 Autor, opisując działania podejmowane przez krajowego operatora przeciw przepływowi nieplanowemu, napisał „W przypadku KSE obecnie stosowane środki

zaradcze nie są wystarczająco skuteczne, dlatego PSE S.A. podjęło działania inwestycyjne w celu zwiększenia możliwości ograniczenia przepływów nieplanowych. Podstawowym środkiem zaradczym jest rozbudowa sieci przesyłowej i zwiększanie jej elastyczności m.in. poprzez wzmocnienie wewnętrznej sieci przesyłowej KSE oraz budowę trzeciego połączenia Polska-Niemcy”. Czy Autor uważa, że wzmocnienie sieci poprzez jej rozbudowę zmniejszy przepływy nieplanowe, czy raczej tylko ograniczy negatywne skutki tych przepływów w KSE ?

Przestawione wyżej uwagi mają w większości charakter dyskusyjny i pozostają bez wpływu na moją, pozytywną ocenę rozprawy. Wszystkie ewentualne nieścisłości należy uznać za zrozumiałe, biorąc pod uwagę złożoność problemu badawczego.

## 5. Podsumowanie

Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (art.13) wymaga, aby rozprawa doktorska stanowiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jestem przekonany o tym, że opiniowana rozprawa spełnia to wymaganie. Sposób rozwiązania problemu naukowego przedstawiony w rozprawie daje ponadto możliwość jego praktycznego wykorzystania.

Lista istotnych osiągnięć rozprawy, które powinny być uznane za oryginalny dorobek Doktoranta zawiera następujące, najistotniejsze elementy:

- opracowanie metody maksymalizacji zapasu przepustowości mocy gałęziowych, bazującej na doborze nastawień PF z uwzględnieniem różnych obszarów regulacji i stanów pracy systemu (normalny i awaryjny),
- opracowanie metody umożliwiającej ograniczenie stopnia wykorzystania elementów infrastruktury elektroenergetycznej, rozumianego jako zmniejszenie drogi przepływu mocy w sytuacji wykorzystywania infrastruktury danego systemu przez odbiory innego systemu;
- opracowanie metod umożliwiających określenie kosztów związanych z wykorzystaniem elementów infrastruktury elektroenergetycznej – w tym metodę uwzględniającą koszty stałe oraz metodę uwzględniającą stopień wykorzystania obu części składowych przekroju przesyłowego: zajętą oraz rezerwową;
- opracowanie wieloskładnikowej funkcji kryterialnej opartej na zdefiniowanych wskaźnikach (z możliwością rozbudowania o kolejne wskaźniki) wraz z sposobem kształtowania funkcji elastyczności dla poszczególnych składników;
- opracowanie przykładowych scenariuszy wykorzystania funkcji kryterialnych dla różnych stanów pracy SEE;
- opracowanie oprogramowania w środowisku Matlab, będącego narzędziem obliczeniowym do opracowanych metod.

Doktorant w rozprawie konsekwentnie realizuje jej cel udowadniając postawione we wstępie tezy. Pomimo drobnych potknięć wykład jest jasny i czytelny oraz zawiera wszystkie istotne elementy: genezę, tezę, przegląd aktualnej wiedzy, sformułowanie problemu, jego rozwiązanie, prezentację wyników, podsumowanie oraz wykaz literatury.

## **6. Wniosek końcowy**

Biorąc pod uwagę przedstawioną powyżej ocenę stwierdzam, że opiniowana rozprawa mgr inż. Mariusza Radwańskiego pt. *„Dobór nastawień przekładni poprzecznych oraz adaptacyjne dostosowywanie (w stanach quasi-ustalonych) obszarów regulacji grup przesuwników fazowych w SEE”* odpowiada wymaganiom ustawowym stawianym przed rozprawami doktorskimi (Ustawa o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 r. – Dz. U. z 2003 r. nr 65, poz. 595 ze zm.) i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony.

