

Rozwiązania konstrukcyjne układów ryglowania napędów szybkich wyłączników elektroenergetycznych

Streszczenie. Wielowęzłowe sieci prądu stałego wysokich i średnich napięć (HVDC, MVDC) wymagają stosowania łączników hybrydowych, w których prąd wyłączeniowy komutowany jest do modułów półprzewodnikowych przy użyciu mechanicznych łączników szybkich. W sieciach średnich napięć stosowane są łączniki mechaniczne wyposażone w obwody rezonansowe wymuszające w obwodzie łącznika zestykowego przejście prądu przez wartość zerową. Wymagania stawiane łącznikom prądu stałego powodują konieczność stosowania w tych łącznikach napędów tzw. szybkich, o czasach działania rzędu pojedynczych milisekund. Wymaga to stosowania konstrukcji elektromagnetycznych (elektromagnesowych lub elektrodynamicznych) napędów szybkich. W niniejszym artykule przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne w zakresie istotnych elementów tych napędów, jakimi są układy ryglowania, utrzymujące styki łącznika w pozycji otwartej lub zamkniętej po ustaniu wymuszenia prądowego o charakterze impulsowym.

Abstract. High-voltage direct current (HVDC) multiterminal networks require the use of hybrid switches, in which the breaking current is commutated to semiconductor modules using mechanical fast switches. In medium voltage networks (MVDC), mechanical switches equipped with resonant circuits are used to force the current in the contact switch circuit to pass through a zero value. The fast operating direct current switches require the use of fast or ultra-fast drives in these switches, with operating times on the order of a few milliseconds. This requires the use of electromagnetic constructions (electromagnetic or electrodynamic). This paper presents design solutions for the key components of these drives, such as locking systems, which keep the switch contacts in the open or closed position after the decay of the pulse current excitation. (**Design Solutions for Locking Systems in Fast-Acting Drives of Power Circuit Breakers**).

Słowa kluczowe: wyłączniki DC, napędy, siłowniki.

Keywords: DC circuit breakers, actuators, drives.

Wstęp

Transformacja energetyczna, skorelowana z procesami regulacyjnymi takimi jak osiągnięcie neutralności klimatycznej do 2050 roku [24], stymuluje rozwój energetyki odnawialnej – wiatrowej, słonecznej i wodnej – oraz równoległy rozwój wielowęzłowych sieci prądu stałego. Sieci te umożliwiają integrację odnawialnych źródeł energii w ramach systemów krajowych, jak również w ramach rynków europejskich i globalnych. Wielowęzłowe sieci prądu stałego, zarówno o napięciu średnim (MVDC) jak i wysokim (HVDC) wymagają łączników prądu stałego (DC) tzw. szybkich, umożliwiających realizację operacji wyłączania prądu w czasie pojedynczych milisekund [25, 26, 27]. Jest to związane z szybkim przyrostem wartości prądów zakłóceń w sieciach DC, w których wartości szczytowe (ustalone) prądów zwarciovych ograniczane są jedynie rezystancjami pętli zwarcia.

Z uwagi na brak w sieciach DC naturalnego przejścia prądu przez wartość zerową (która w naturalny sposób występuje w sieciach AC), wyłączanie prądów roboczych i zakłóceń realizowane jest w sieciach DC przez tzw. hybrydowe wyłączniki prądu stałego [28, 29]. Wyłączniki te zbudowane są w oparciu o zestaw łączników półprzewodnikowych, niewymagających zera prądu do wykonania łączenia oraz dodatkowo wyposażone są w szybki lub ultraszybki łącznik mechaniczny, umożliwiający szybką komutację prądu pomiędzy poszczególnymi łącznikami półprzewodnikowymi. W sieciach prądu stałego średnich napięć (MVDC) stosowane są również łączniki zestykowe wyposażone w obwód rezonansowy, wymuszający w obwodzie łącznika zestykowego przejście prądu przez wartość zerową [30]. W obu przypadkach, łączników hybrydowych i zestykowych wyposażonych o

gałąź rezonansową, kluczowym elementem wyłącznika, decydującym o szybkości realizowanej przez łącznik operacji wyłączania prądu, jest szybki napęd łącznika zestykowego.

Klasycznym rozwiązaniem napędu wyłącznikowego jest układ mechaniczny zasobnikowo-sprężynowy, realizujący operację otwierania i zamykania styków łącznika poprzez rozładowanie energii zgromadzonej w zasobnikach sprężynowych, które połączone są ze stykiem ruchomym, osadzonym w komorze gaszeniowej łącznika, poprzez układ krzywek, wałów i cięgien [31]. Napędy takie, w przypadku wyłączników średnich napięć, umożliwiają osiągnięcie pełnego otwarcia styków wyłącznika w czasie rzędu kilkudziesięciu milisekund, co jest czasem znacznie przekraczającym wymagania stawiane wyłącznikom prądu stałego.

Znacznie krótsze czasy zadziałania umożliwiają napędy łącznikowe oparte o konstrukcje elektromagnesowe, bazujące na sile przyciągania ruchomego elementu ferromagnetycznego oraz o konstrukcje elektrodynamiczne wykorzystujące oddziaływanie elektrodynamiczne przewodników (cewek) przewodzących prąd elektryczny. W zakresie tych konstrukcji prowadzone są aktualnie prace badawcze i rozwojowe zmierzające do rozwoju i adaptacji tych konstrukcji w zastosowaniu do łączników szybkich prądu stałego [32]. Przykładem są prace badawcze nad konstrukcjami będącymi rozwinięciem koncepcji siłownika Thomsona [33], zasilanego z kondensatorowych obwodów impulsowych [34, 35, 36]. Napędy te zbudowane są z [32]: siłownika (dwocewkowego, tzw. Thomsona, lub trójcewkowego), zasobnika energii wytwarzającego prąd impulsowy niezbędny do przemieszczenia elementów wykonawczych (cewek) siłownika o odpowiedniej dynamice

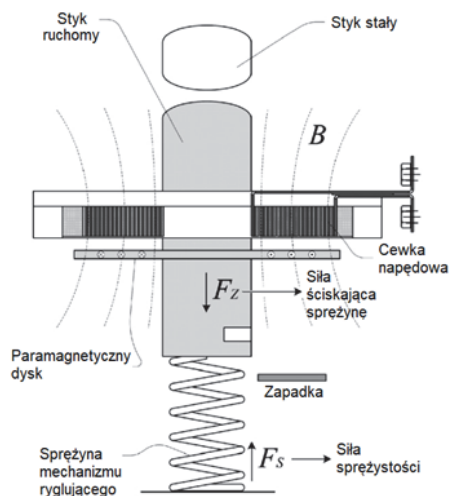
przemieszczenia, układu ryglowania utrzymującego styki w pozycji otwartej lub zamkniętej po ustaniu wymuszenia prądowego, układu sterowania.

W niniejszym artykule przedstawiono przegląd rozwiązań konstrukcyjnych układów ryglowania napędów elektromagnetycznych i elektrodynamicznych wyłączników szybkich. W zależności od zastosowania napędu szybkiego w łączniku o danej zdolności łączeniowej, wyłącznikowym układom ryglowania stawione jest wymaganie uzyskania siły docisku stykowego w pozycji zamkniętej rzędu kilku kN, w zależności od wartości prądu wyłączanego [3,15] (dobrym przybliżeniem jest relacja 100 N docisku stykowego na 1 kA prądu wyłączanego). W przypadku aparatów nieprzeznaczonych do wyłączania prądów zwarciovych wymagana siła docisku jest mniejsza. Dodatkowo, układy ryglowania powinny być lekkie, aby nie zwiększały znacząco całkowitej masy siłownika, co konieczne jest w celu uzyskania odpowiedniej dynamiki ruchu styku generowanej przez siłownik napędu szybkiego.

Uzyskiwana charakterystyka siły w funkcji przemieszczenia układu ryglowania typowo jest symetryczna i opisywana przez nieparzystą funkcję przemieszczenia elementu wykonawczego siłownika. Umożliwia to uzyskanie odpowiedniej wartości siły docisku stykowego, a następnie, po pokonaniu tzw. martwego położenia, odpowiedniej wartości siły odciągania styków.

Mechanizmy ryglowania w napędach łączników

Zadaniem łączników jest niezawodne przewodzenie prądu w stanie normalnym pracy sieci elektroenergetycznej oraz wykonywanie operacji łączeniowych w stanie normalnym oraz w stanach zakłóceń sieci. Operacje łączeniowe mają na celu doprowadzenie układu sieci do pożądanego przez operatora stanu sprawiając, że dana gałąź systemu zostanie włączona lub wyłączona z eksploatacji. Sama czynność łączeniowa, nawet jeśli przeprowadzona poprawnie, nie gwarantuje jednak, że łącznik po jej wykonaniu będzie się utrzymywał w stanie otwartym bądź zamkniętym. Aby zapewnić kontrolę nad stanem łącznika, układy napędowe wyposaża się w mechanizmy ryglujące, których zadaniem jest utrzymanie styku ruchomego łącznika w pozycji otwartej, bądź zapewnienie jego docisku do styku stałego w przypadku, gdy łącznik znajduje się w pozycji zamkniętej.



Rys. 1. Mechanizm ryglujący ze spiralną sprężyną, wg [23]

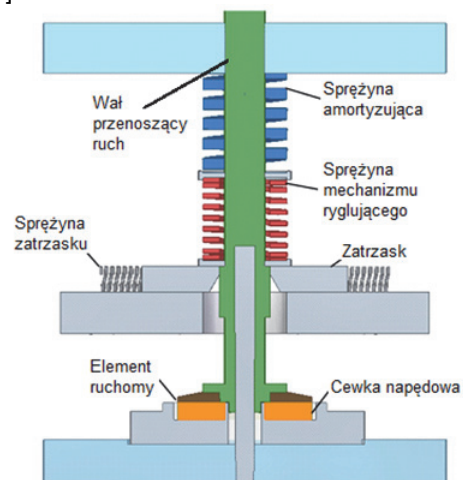
Mechanizmy zapadkowe ze sprężyną spiralną

Tego rodzaju mechanizmy, których przykład widoczny jest na rysunku 1, umożliwiają utrzymywanie styku

ruchomego zarówno w stanie zamkniętym jak i otwartym. Zasada mechanizmu zapadkowego ze sprężyną spiralną polega na tym, że utrzymanie łącznika w stanie otwartym zapewnione jest przez zapadkę o specjalnej konstrukcji, natomiast do utrzymywania łącznika w stanie zamkniętym używana jest energia zgromadzona w sprężynie, gdy łącznik znajdował się w pozycji otwartej.

Stosuje się w tym celu różne mechanizmy ryglujące. W przypadku napędów z siłownikami elektromagnesowymi [1-5] są to typowo magnetyczne mechanizmy ryglujące, natomiast w przypadku wyłączników szybkich [6-19, 21] stosuje się różnego rodzaju układy ryglowania styku ruchomego, wykorzystujące mechanizmy zapadkowe ze sprężyną spiralną [10,23], bistabilne mechanizmy sprężynowe [14,15], mechanizmy ze sprężyną talerzową [6-9] oraz ryglujące mechanizmy magnetyczne [11-13].

Zazwyczaj ruch styku ruchomego wiąże się ze ścisaniem sprężyny (wtedy gromadzona jest w niej energia) lub rozprężaniem jej (zmagazynowana energia jest wówczas uwalniana). Ścisanie ma najczęściej miejsce w trakcie operacji otwierania łącznika. Element ruchomy sprężnięty ze stykiem ruchomym oraz sprężyną powoduje wówczas rozejście się styków przy jednoczesnym ściśnięciu sprężyny. Wtedy też dochodzi do zablokowania styku ruchomego poprzez mechanizm zapadkowy. W takim stanie, styk ruchomy jest zablokowany w pozycji otwartej, a żeby zamknąć łącznik należy usunąć zapadki blokujące. Po wykonaniu tej czynności energia sprężystości zgromadzona w sprężynie wprawia styk ruchomy w ruch zamykając jednocześnie łącznik, a także dociskając styk ruchomy, z odpowiednią siłą docisku, do styku stałego. Tego typu mechanizm, widoczny na rysunku 2, rozpatrywany był w pracy [10].



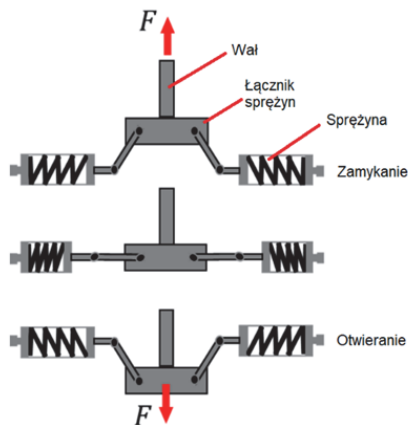
Rys. 2. Konstrukcja napędu z układem ryglującym zapadkowym ze spiralną sprężyną, wg [10]

Rozwiązanie układu ryglującego z elementem zapadkowym napędzanym sprężyną spiralną jest proste konstrukcyjnie, a przy tym nie zwiększające w sposób znaczny masy oraz całkowitej objętości napędu. Wadą tego rozwiązania jest natomiast to, że podczas ruchu siłownik musi pokonać siłę oporu stawianą przez sprężynę mechanizmu ryglującego. Z tego względu mechanizmy sprężynowe z zapadkami stosowane są w napędach łączników, których proces otwierania i zamykania może być stosunkowo długi.

Bistabilne mechanizmy sprężynowe

Mechanizmy tego typu składają się z dwóch sprężyn połączonych ze sobą przy użyciu łącznika sprężniętego z układem przenoszącym ruch z siłownika na styk ruchomy. Przykład takiej konstrukcji przedstawiono na rysunku 3.

W mechanizmach tego typu występuje tzw. martwe położenie, w którym sprężyny są maksymalnie ściśnięte. Po przekroczeniu tego położenia zmienia się kierunek działania siły pochodzącej od mechanizmu. Mechanizmy tego typu w zależności od zastosowanych sprężyn są w stanie dociskać styk ruchomy oraz odciągać go z różną siłą. W przypadku przedstawionym w [14] styk jest dociskany z siłą około 1,5 kN, natomiast w stanie otwartym utrzymuje go siła o wartości kilkuset niutonów. Masa ruchoma, na którą działają te siły ma w przypadku [14] wartość 3,5 kg. Natomiast w [15] mechanizm odznacza się większymi siłami działającymi na masę ruchomą, która w [15] ma wartość 7 kg. Docisk tej masy odbywa się z siłą 3,5 kN, natomiast do utrzymania jej w pozycji otwartej używa się siły o wartości 4 kN. Wynika stąd, że wraz ze zwiększeniem masy ruchomej rośnie wartość siły potrzebnej do utrzymywania łącznika w pozycji otwartej, natomiast maleje wartość siły, która potrzebna jest do dociskania styków.



Rys. 3. Bistabilny mechanizm blokujący ze sprężyną, wg [22]

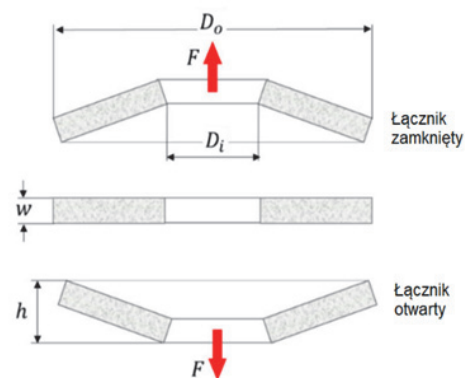
Bistabilne mechanizmy sprężynowe są bardziej złożone konstrukcyjnie niż pozostałe mechanizmy ryglujące. Wynika to z potrzeby wykonania połączenia mechanicznego pomiędzy dwoma sprężynami oraz sprężnięcia tych sprężyn z wałem głównym wyłącznika przenoszącym ruch z napędu na ciągną połączone ze stykiem ruchomym komory gaszeniowej. Zwiększa to masę układu napędowego oraz siłę potrzebną do przemieszczenia masy ruchomej. Układy takie można jednak łatwo zastosować w napędzie łącznika, oferując one również siły docisku oraz odciągania o wystarczających wartościach – co sprawia, że znajdują one zastosowanie w napędach łączników szybkich [14,15].

Bistabilne mechanizmy ze sprężyną talerzową

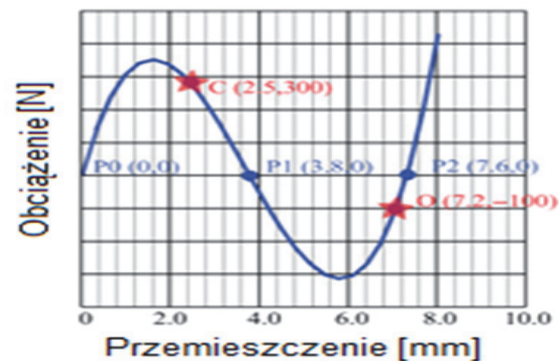
Układy ryglujące wyposażone w sprężyny talerzowe (wykonywane najczęściej ze stalowej blachy) występują w dwóch wersjach: monostabilnej (sprężyna jednokierunkowa) i bistabilnej (sprężyna dwukierunkowa). Przykład konstrukcji ze sprężyną talerzową monostabilną został przedstawiony w pracy [8]. Taki wariant układu ryglującego pozwala na utrzymywanie łącznika tylko w jednej, wybranej pozycji. Natomiast mechanizm w wersji z talerzową sprężyną dwukierunkową umożliwia odkształcanie sprężyny w obu kierunkach oraz utrzymywanie łącznika w pozycji otwartej lub zamkniętej przy jednoczesnym zapewnieniu siły dociskowej wystarczającej do utrzymania styku ruchomego w wybranej pozycji. Przykłady takich mechanizmów zostały przedstawione w pracach [7] i [9]. Konstrukcję sprężyny talerzowej bistabilnej przedstawiono na rysunku 4.

W pracy [7] wykonano analizę obciążenia sprężyny dociskowej styku ruchomego w funkcji jej odkształcenia. Rysunek 5 przedstawia uzyskaną nieliniową charakterystykę obciążenia mechanicznego sprężyny

talerzowej. Widoczne na rysunku 5 punkty P_0 , P_1 oraz P_2 to martwe położenia sprężyny talerzowej. Punkty C oraz O przedstawiają obciążenie sprężyny, gdy łącznik znajduje się w stanie zamkniętym (C) oraz otwartym (O). W stanie zamkniętym siła dociskająca styki wynosi 300 N, natomiast gdy łącznik jest otwarty siła ta jest skierowana w przeciwnym kierunku i ma wartość 100 N. Istotnym jest fakt, że maksymalna wartość siły jest osiągana przed osiągnięciem pozycji otwartej, co dodatkowo wspomaga proces otwierania łącznika. Istotne jest również to, że pole powierzchni pod wykresem (od punktu P_1 do punktu P_2) odpowiada energii, którą sprężyna może zaabsorbować (jest to energia, którą może zaabsorbować sprężyna nim ponownie znajdzie się w martwym położeniu), dzięki czemu może ona jednocześnie wspomóc proces tłumienia ruchu masy ruchomej, co jest zaletą tego mechanizmu ryglującego. Ważną zaletą mechanizmów ze sprężynami talerzowymi jest również stosunkowo duża uzyskiwana siła (np. 400 N na rysunku 5) przy niewielkim przemieszczeniu (4,7 mm na rysunku 5).



Rys. 4. Sprężyna talerzowa dwukierunkowa: D_i – średnica wewnętrzna sprężyny, D_o – średnica zewnętrzna sprężyny, w – grubość sprężyny, h – maksymalne wychylenie sprężyny, wg [22]



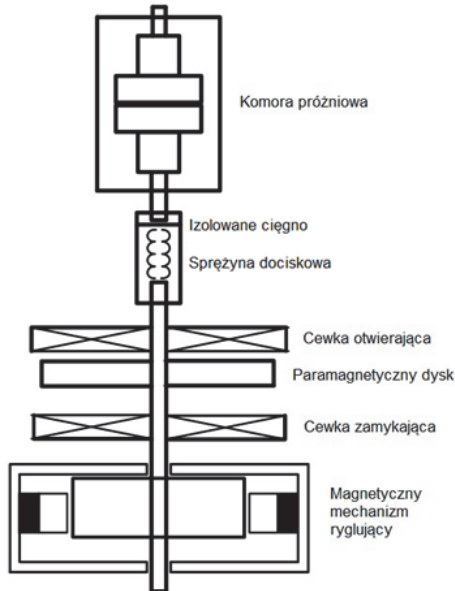
Rys. 5. Charakterystyka obciążenia mechanicznego talerzowej sprężyny dociskowej w funkcji odkształcenia sprężyny, wg [7]

Magnetyczne mechanizmy ryglujące

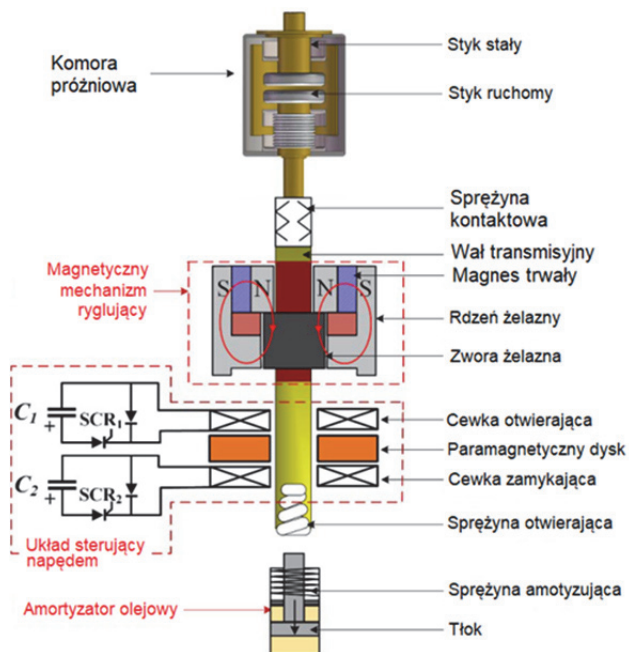
Magnetyczne mechanizmy ryglujące działają w oparciu o zastosowanie magnesów trwałych, do których przyciągana jest zwora dołączona do wału głównego łącznika przenoszącego ruch z siłownika na styk ruchom komory gaszeniowej. Mechanizmy magnetyczne mogą występować jako wyłączne układy ryglowania w napędzie [11, 13] (rys. 6) lub w połączeniu ze sprężynowym mechanizmem ryglującym [12] (rys. 7). W rozwiązaniach, w których zastosowane jest jedynie ryglowanie magnetyczne, do utrzymywania łącznika w wybranej pozycji wykorzystuje się siłę magnetyczną działającą na ruchomą zworę przymocowaną do styku ruchomego, która jest przyciągana

i blokowana w wybranej pozycji dzięki sile magnetycznej pochodzącej od magnesów trwałych.

W pracach [11] oraz [13] siła dociskająca styk ruchomy miała wartość dwukrotnie większą, niż siła wykorzystywana do utrzymywania łącznika w stanie otwartym. Dla mechanizmu opisanego w [13] siła działająca na styk w pozycji zamkniętej wynosiła około 4 kN, zaś w pozycji otwartej około 1,8 kN. Natomiast dla mechanizmu [11] były to, odpowiednio, siły o wartości 2 kN i 1 kN.



Rys. 6. Napęd z magnetycznym mechanizmem ryglującym, wg [11]



Rys. 7. Przykład magnetycznego mechanizmu ryglującego w połączeniu ze sprężynowym mechanizmem ryglującym, wg [12]

W magnetycznym mechanizmie ryglowania połączonym ze sprężyną (rys. 7) opisanym w pracy [12], w trakcie operacji otwierania łącznika siłownik porusza elementem ruchomym, z którym sprzęgnięty jest styk ruchomy oraz ruchoma zwora mechanizmu ryglującego. W trakcie tego ruchu ścisnana jest również sprężyna, która magazynuje w sobie energię. Po zakończeniu ruchu otwierania łącznika sprężyna jest ściśnięta i gotowa do uwolnienia swojej

energii w trakcie procesu zamykania, natomiast styk ruchomy jest utrzymywany w pozycji otwartej dzięki przyciąganiu zwory do obecnych w mechanizmie magnesów trwałych. Mechanizm ten odznacza się prostą konstrukcją oraz oferuje stosunkowo dużą siłę. Natomiast wadą tego rozwiązania jest duża masa, gdyż przedstawione w pracach [11-13] układy ryglujące są wykonane z żelaza dla zapewnienia dużej przewodności magnetycznej. Inną wadą tych mechanizmów jest potrzeba działania przeciwnie, co jest niezbędne do zwolnienia blokady i stanowi dodatkowy wydatek energetyczny.

Podsumowanie

Aktualnie prowadzone badania w zakresie łącznikowych napędów szybkich prowadzone są w obszarze rozwoju aparatury łączeniowej prądu stałego średnich i wysokich napięć.

Odziaływania elektrodynamiczne w łącznikowych napędach szybkich powstają w wyniku rozładowania obwodu impulsowego. Powoduje to, że elektrodynamiczna siła napędowa o przebiegu impulsowym wymaga stosowania zewnętrznych układów ryglowania, umożliwiających uzyskanie oraz stabilne utrzymanie żądanych pozycji styków łącznika.

Dla uzyskania pożądanych charakterystyk dynamiki ruchu styków w łącznikach szybkich preferowane są konstrukcje mechaniczne napędów bazujące na stosach sprężyn, co pozwala na znaczne obniżenie masy przemieszczanych elementów. Istotnymi zaletami układów magnetycznych jest wysoka wartość siły uzyskiwanej w fazie docisku styków oraz względnie stała charakterystyka siła działającej na styk ruchomy w szerokim zakresie przemieszczeń.

Układy zapadkowe charakteryzują się ograniczoną trwałością mechaniczną krawędzi progu będącego elementem, o który blokowana jest zapadka układu ryglowania. Sama zapadka jest również elementem kłopotliwym, z uwagi na występowanie szlifowania lub wyszczerbienia podczas operacji łączeniowych. W przypadku zużycia elementów rygla (braku zatrzaśnięcia się zapadki o próg), wstępnie ugięty stos sprężyn powoduje samoczynne zamknięcie się łącznika. Stwarza to wątpliwości co do zasadności zastosowania tego układu w aplikacjach wyłącznikowych.

Układ talerzowy posiada zaletę niskiej masy oraz praktycznie braku połączeń zawiasowych. Wadą tego układu jest natomiast względnie niski zakres realizowanych przemieszczeń, odpowiadający aparaturze łączeniowej z zakresu niskich i średnich napięć. W tych konstrukcjach, wzrost przemieszczeń wymaga zwiększenia średnicy talerza, co powoduje niepożądany wzrost podziałki biegunowej aparatury łączeniowej.

Układy sprężynowe aktualnie są konstrukcjami najbardziej obiecującymi w zastosowaniu do napędów wyłączników szybkich. Są one podatne na modyfikacje charakterystyk siłowych, m. in. poprzez stosowanie stosów sprężyn o różnej twardości. Ponadto, regulacja charakterystyki siłowej jest możliwa również podczas eksploatacji łącznika (co jest trudne do osiągnięcia w konstrukcjach talerzowych). Skalowanie układów ryglujących dla konstrukcji wysokonapięciowych, a zatem układów o większych skokach styków, wymaga uwzględnienia większych wymagań w odniesieniu do pracy mechanicznej siłownika związanej z ugięciem stosów sprężyn. Z tego względu, konieczne są nowe konstrukcje układów ryglowych, o bardziej korzystnych niż stosowane obecnie charakterystykach siłowych.

Autorzy: mgr inż. Kamil Przygoda, mgr inż. Szymon Stoczko, dr inż. Tadeusz Daszczyński, dr hab. inż. Marcin Szewczyk, prof. PW, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, Plac Politechniki 1, 00-661 Warszawa; E-mail: kamil.przygoda@pw.edu.pl, szymon.stoczko@pw.edu.pl, tadeusz.daszczyński@pw.edu.pl, marcin.szewczyk@pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Chaly, A. M., Chervinskyi, O. I., & Poluyanov, V. N. (2005, June). *New generation of vacuum circuit breakers with monostable magnetic actuator*. In CIREC 2005-18th International Conference and Exhibition on Electricity Distribution (pp. 1-4). IET.
- [2] Xiaodong, X., Zhibing, X., Xianqian, Y., Beiyang, L., & Yang, T. (2017, October). *Design and test of vacuum circuit breaker with hybrid fast operating mechanism*. In 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST) (pp. 939-946). IEEE.
- [3] Dullni, E., Fink, H., & Reuber, C. (1999, June). *A vacuum circuit-breaker with permanent magnetic actuator and electronic control*. In Proceedings CIREC (pp. 150-156). France.
- [4] Xu, J., Zhang, P., Deng, Y., Dong, E., Tian, Y., Cong, Y., & Tian, K. (2017, October). *A new electromagnetic force actuator for 126kV vacuum circuit breaker*. In 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST) (pp. 664-667). IEEE.
- [5] Fang, S., Lin, H., & Ho, S. L. (2009). *Transient co-simulation of low voltage circuit breaker with permanent magnet actuator*. IEEE Transactions on Magnetics, 45(3), 1242-1245.
- [6] Peng, C., Mackey, L., Husain, I., Huang, A. Q., Yu, W., Lequesne, B., & Briggs, R. (2017). *Active damping of ultrafast mechanical switches for hybrid AC and DC circuit breakers*. IEEE Transactions on Industry Applications, 53(6), 5354-5364.
- [7] Peng, C., Husain, I., Huang, A. Q., Lequesne, B., & Briggs, R. (2016). *A fast mechanical switch for medium-voltage hybrid DC and AC circuit breakers*. IEEE Transactions on Industry Applications, 52(4), 2911-2918.
- [8] Takeuchi, T., Koyama, K., & Tsukima, M. (2005). *Electromagnetic analysis coupled with motion for high-speed circuit breakers of eddy current repulsion using the tableau approach*. Electrical Engineering in Japan, 152(4), 8-16.
- [9] Yuan, Z., He, J., Pan, Y., Jing, X., Zhong, C., Zhang, N., ... & Tang, G. (2016). *Research on ultra-fast vacuum mechanical switch driven by repulsive force actuator*. Review of Scientific Instruments, 87(12).
- [10] Sim, M. S., Bukhari, S. S. H., & Ro, J. S. (2022). *Analysis and design of a Thomson coil actuator system for an HVDC circuit breaker*. IEEE Access, 10, 58354-58359.
- [11] Jiang, W., Liu, X., Chen, H., & Li, P. (2020, October). *Analysis on dynamic characteristics of fast operating mechanism of vacuum circuit breaker*. In 2020 IEEE International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD) (pp. 1-2). IEEE.
- [12] Hou, Y., Shi, Z., Li, S., Yao, Q., Miao, Y., Zhang, S., & Qiu, N. (2019). *Research on fast opening process in electromagnetic repulsion mechanism*. IEEE Transactions on Magnetics, 55(6), 1-4.
- [13] Chunguang, H., Jinjin, W., Ying, H., Yundong, C., & Yuchen, C. (2016, September). *Design and research of high stability repulsion mechanism of 12kV vacuum circuit breaker*. In 2016 27th International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum (ISDEIV) (Vol. 2, pp. 1-4). IEEE.
- [14] Baudoin, A., Hátsági, B., Álvarez, M., Ångquist, L., Nee, S., Norrga, S., & Modeer, T. (2019). *Experimental results from a Thomson-coil actuator for a vacuum interrupter in an HVDC breaker*. The Journal of Engineering, 2019(17), 3527-3531.
- [15] Tian, Y., Zhu, Y., Dong, E., Tian, Y., & Li, Z. (2017, October). *Simulation of high-speed mechanical switch on multi-field coupling*. In 2017 4th International Conference on Electric Power Equipment-Switching Technology (ICEPE-ST) (pp. 934-938). IEEE.
- [16] Lequesne, B., Holp, T., Schmalz, S. C., Slepian, R. M., & Wang, H. (2023). *Frequency-domain analysis and design of Thomson-coil actuators*. IEEE Transactions on Industry Applications, 59(2), 1765-1774.
- [17] Wu, Y., Wu, Y., Rong, M., Yang, F., Zhong, J., Li, M., & Hu, Y. (2015). *A new Thomson coil actuator: Principle and analysis*. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, 5(11), 1644-1655.
- [18] Li, W., Jeong, Y. W., & Koh, C. S. (2010). *An adaptive equivalent circuit modeling method for the eddy current-driven electromechanical system*. IEEE Transactions on Magnetics, 46(6), 1859-1862.
- [19] Zhou, Y., Huang, Y., Wen, W., Lu, J., Cheng, T., & Gao, S. (2019). *Research on a novel drive unit of fast mechanical switch with modular double capacitors*. The Journal of Engineering, 2019(17), 4345-4348.
- [20] Bucher, M. K., & Franck, C. M. (2015). *Fault current interruption in multiterminal HVDC networks*. IEEE Transactions on Power Delivery, 31(1), 87-95.
- [21] Augustin, T., Parekh, M., Magnusson, J., Becerra, M., & Nee, H. P. (2021). *Thomson-coil actuator system for enhanced active resonant DC circuit breakers*. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 10(1), 800-810.
- [22] Al-Dweikat, M., Cui, J., Sun, S., Yang, M., Zhang, G., & Geng, Y. (2022, June). *A review on Thomson coil actuators in fast mechanical switching*. In Actuators (Vol. 11, No. 6, p. 154). MDPI.
- [23] Roodenburg, B., & Evenblij, B. H. (2008). *Design of a fast linear drive for (hybrid) circuit breakers—development and validation of a multi domain simulation environment*. Mechatronics, 18(3), 159-171.
- [24] Directorate-General for Climate Action (European Commission), "Going climate-neutral by 2050: A strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate-neutral EU economy," 2019
- [25] Sajjadi A, Kadkhodaei G, Hamzeh M, Tavakoli SD, Gomis-Bellmunt O. An Integrated Multi-Port Circuit Breaker With Current Flow Controlling Capability for Meshed Multi-Terminal HVDC Grids; IEEE Transactions on Power Electronics; 2024 May 2.
- [26] Dai Z, Li Y. A multi-functional multi-port hybrid DC circuit breaker for flexible DC distribution networks; IEEE Transactions on Power Delivery; 2023 Nov 15.
- [27] P. Cairoli, R. A. Dougal, "New Horizons in DC Shipboard Power Systems: New fault protection strategies are essential to the adoption of dc power systems", IEEE Electrification Magazine, Vol. 1, No. 2, pp. 38-45, December 2013
- [28] Peng C, Song X, Huang AQ, Husain I. A medium-voltage hybrid DC circuit breaker – Part II: Ultrafast mechanical switch. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics; 2016 Oct 13;5(1):289-96.
- [29] Callavik M, Blomberg A, Häfner J, Jacobson B. The hybrid HVDC breaker. ABB Grid Systems Technical Paper (white paper). 2012 Nov;361(2012):143-52.
- [30] Barnes M, Vilchis-Rodriguez DS, Pei X, Shuttleworth R, Cwikowski O, Smith AC. HVDC circuit breakers—A review. IEEE Access. 2020 Nov 23;8:211829-48.
- [31] ABB Distribution Solutions, "VM1: Medium voltage vacuum circuit breakers with magnetic drive," 2018
- [32] S. Stoczko, "Trójcewkowy siłownik elektrodynamiczny do zastosowania w napędzie szybkim wyłącznika", rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Instytut Elektroenergetyki (w przygotowaniu, na prawach rękopisu), 2024
- [33] Al-Dweikat M., Cui J., Sun S., Yang M., Zhang G., Geng Y., A Review on Thomson Coil Actuators in Fast Mechanical Switching, Actuators 2022, 11, 154.
- [34] Hou Y., Shi Z., et al., Research on Fast Opening Process in Electromagnetic Repulsion Mechanism, IEEE Transaction on Magnetics, vol. 55, no. 6, 2019
- [35] Peng C., Husain I., et al., Active Damping of Ultrafast Mechanical Switches for Hybrid AC and DC Circuit Breaker, IEEE Transaction on Industry Applications, vol. 53, no. 6, 2017
- [36] Augustin T., Parekh M., Magnusson J., Becerra M., Nee H. P., Thomson-Coil Actuator System for Enhanced Active Resonant DC Circuit Breakers, IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, vol. 10, no. 1, pp. 800-810, Feb. 2022