



Autor: **Marcin Lizer**
Tytuł: **Zabezpieczenia podimpedancyjne jednostek wytwórczych w czasie kołysań mocy**
Seria: **Monografie Instytutu Energetyki, nr 1**
Warszawa 2018, Wyd. I.
Wydawnictwo Instytutu Energetyki
ISBN 978-83-63226-11-4

Kołysania mocy mogą występować w systemach elektroenergetycznych, w których pracują generatory synchroniczne. Zjawisko to stanowi istotne zagrożenie dla bezpieczeństwa pracy systemu, a co za tym idzie dla pewności dostarczania energii elektrycznej do odbiorców końcowych. W skrajnych przypadkach może ono istotnie przyczynić się do powstania rozległych awarii systemowych (ang. *blackout*).

Kołysania mocy są wywołane zaburzeniami bilansu pomiędzy obciążeniem mocą czynną pracujących w sieci synchronicznych jednostek wytwórczych oraz mocami mechanicznymi dostarczonymi przez ich jednostki napędowe. Obciążenie czynne generatora synchronicznego jest w tym przypadku proporcjonalne do momentu hamującego na jego wale, a zadana moc mechaniczna, jest proporcjonalna do jego momentu napędowego. W stanie ustalonym momenty te równoważą się. W czasie stanów nieustalonych, a w szczególności podczas zmian konfiguracji sieci zewnętrznej (istotnie zmieniających jej impedancję zastępczą) oraz zakłóceń zwarciovych, równowaga ta zostaje zachwiana. W efekcie takich zaburzeń w pracy systemu, wirniki generatorów synchronicznych podlegają dodatnim i ujemnym przyspieszeniom, w efekcie czego wahaniom ulegają parametry elektryczne energii oddawanej przez te źródła do sieci.

W zależności od poziomu zaburzenia równowagi pracy generatora synchronicznego w systemie, kołysania mocy mogą mieć charakter synchroniczny lub asynchroniczny.

W przypadku kołysań synchronicznych, po wystąpieniu zaburzenia równowagi (np. zmiany konfiguracji sieci, lub szybko zlikwidowanego zwarcia) wirnik generatora synchronicznego nie doznaje dużych przyspieszeń, dzięki czemu generator jest w stanie oscylacyjnie osiągnąć stan ustalony. W takim przypadku, prądy i napięcia generatora podlegają gasnącym wahaniom, poprzez które osiąga on stabilny punkt pracy. Opisywany typ kołysań mocy jest stosunkowo niegroźny dla pracy systemu, lecz oddziałuje on negatywnie na żywotność turbozespołu na skutek występowania kumulujących się momentów skręcających jego wał. W przypadku kołysań asynchronicznych, na skutek wystąpienia zaburzenia równowagi (np. znacznego spadku mocy zwarciowej sieci po zmianie jej konfiguracji lub zbyt wolno likwidowanego zwarcia) wirnik generatora synchronicznego podlega znacznemu przyspieszeniu, którego nie jest w stanie wytracić. Powoduje to utratę synchronizmu współpracy generatora z siecią. W takiej sytuacji, wirnik generatora zaczyna podlegać cyklicznym przyspieszeniom i opóźnieniom, przez co zaczyna kręcić się ze zmienną prędkością, nierówną prędkości synchronicznej (zależnej od częstotliwości sieci oraz konstrukcji generatora). Opisywany typ kołysań mocy jest groźny dla pracy systemu, samego turbozespołu, który utracił synchronizm oraz innych elementów sieci.

W czasie asynchronicznych kołysań mocy maszyny synchroniczne są narażone między innymi na: występowanie znacznych oscylacji prądów i napięć, dużych momentów skręcających, nadmierne

nagrzewanie się skrajnych elementów stojana generatora oraz na niewłaściwą pracę napędów potrzeb własnych. Z powyższych powodów, generator synchroniczny podlegający kołysaniom asynchronicznym powinien zostać odcięty od sieci, w efekcie działania jego zabezpieczenia od skutków utraty synchronizmu. Pozwoli to na utrzymanie turbozespołu oraz potrzeb własnych bloku w pracy, dzięki czemu możliwa będzie szybka ponowna synchronizacja takiego źródła z siecią.

Kołysania mocy mają też istotny wpływ na pracę automatyki zabezpieczeniowej bloków wytwórczych i elementów sieci. Szczególnie duże oddziaływanie na pracę układów elektroenergetycznej automatyki zabezpieczeniowej mają asynchroniczne kołysania mocy, podczas których mają miejsce duże wahania prądów i napięć. W czasie tego typu stanów nieustalonych może dochodzić do zbędnych zaszłań zabezpieczeń bloków wytwórczych, transformatorów i linii elektroenergetycznych pracujących w sieci.

Na nieprawidłowe działanie podczas kołysań mocy są szczególnie narażone zabezpieczenia pracujące w oparciu o kryterium podimpedancyjne. Kryterium to jest stosowane do wykrywania zwarć w obwodach bloków wytwórczych, transformatorach i liniach elektroenergetycznych. Jest ono również stosowane do realizacji zabezpieczeń wykrywających nieprawidłowe stany pracy generatorów synchronicznych, w szczególności: do wykrywania utraty lub niewystarczającego wzbudzenia generatora, a także do detekcji utraty synchronizmu (czyli asynchronicznych kołysań mocy).

Zabezpieczenia wykorzystujące kryterium podimpedancyjne do wykrywania zwarć są nazywane zabezpieczeniami impedancyjnymi lub odległościowymi¹. Powyższe zabezpieczenia wyznaczają impedancję pętli zwarcia na podstawie pomiaru trójfazowego prądu i napięcia. Pomiaru te realizowane są za pomocą przekładników prądowych i napięciowych, charakteryzujących się zabezpieczeniową klasą dokładności, a w przypadku przekładników prądowych, wysokim granicznym współczynnikiem dokładności.

W czasie pracy normalnej, impedancja widziana z miejsca pomiaru prądu i napięcia przez opisywane zabezpieczenia, jest zwykle stosunkowo duża (wynika z ilorazu napięcia i prądu przepływającego przez zabezpieczany element). W sytuacji powstania zwarcia w niewielkiej odległości od miejsca pomiaru prądów i napięć przez zabezpieczenie, mierzona przez nie impedancja zmniejsza się skokowo. Zgodnie z powyższym, zabezpieczenia impedancyjne i odległościowe działają w oparciu o tak zwane strefy rozruchowe, czyli ograniczone obszary na płaszczyźnie impedancji zespolonej. Granice danej strefy zabezpieczenia są dobierane tak, aby mogło ono selektywnie wykrywać zwarcia w danym elemencie lub obszarze sieci. Do pobudzenia danej strefy zabezpieczenia dochodzi jeśli mierzona przez urządzenie zabezpieczeniowe impedancja zespolona znajdzie się w jej obszarze (np. po wystąpieniu zwarcia w zabezpieczanym elemencie systemu). Po pobudzeniu strefy, może dojść do jej zaszłań, jeśli mierzona impedancja pozostanie w jej obszarze przez okres co najmniej równy nastawionemu opóźnieniu jej działania. Stosowanie ograniczonych zasięgów, skoordynowanych czasów opóźnień oraz kierunkowości stref zabezpieczeń impedancyjnych i odległościowych, pozwala osiągnąć selektywność ich pracy oraz zapewnić zdalne rezerwowanie zabezpieczeń sąsiednich elementów sieci.

¹ Zabezpieczenia impedancyjne linii elektroenergetycznych są często nazywane zabezpieczeniami odległościowymi. Nazwa ta wynika z faktu, że linie elektroenergetyczne mają w przybliżeniu stałą impedancję jednostkową (każdy kilometr danej linii ma w przybliżeniu taką samą impedancję). Z tego powodu, impedancja liczona od miejsca pomiaru prądów i napięć przez zabezpieczenie odległościowe linii do miejsca zwarcia jest proporcjonalna do odległości do miejsca zwarcia.

Bloki wytwórcze wyposaża się zwykle w zabezpieczenie impedancyjne (mierzące prąd w punkcie neutralnym generatora i napięcie na jego zaciskach) oraz odległościowe (mierzące prąd i napięcie w polu blokowym stacji, do której blok jest przyłączony poprzez linię blokową). Zabezpieczenia te stanowią rezerwę w stosunku do zabezpieczeń różnicowych generatora, transformatora blokowego, linii blokowej oraz bloku. W zależności od przyjętych zasięgów stref rozruchowych, mogą one również być rezerwowymi zabezpieczeniami bloku od skutków zwarć zewnętrznych (zlokalizowanych w sieci).

Zabezpieczenie impedancyjne bloków wytwórczych (oznaczenie ANSI: 21e) działa zwykle z dwustrefową, kołową charakterystyką rozruchową o środku w punkcie [0,0] płaszczyzny impedancji (działa więc bezkierunkowo). Dzięki takiemu ukształtowaniu stref tego zabezpieczenia, jest ono w stanie wykrywać zwarcia w uzwojeniach generatora, obwodach dolnego napięcia bloku, w uzwojeniach transformatora blokowego, w linii blokowej oraz w niewielkim fragmencie sieci zewnętrznej.

Drugim rezerwowym zabezpieczeniem podimpedancyjnym jednostek wytwórczych od skutków zwarć w ich obwodach oraz w sieci zewnętrznej jest zabezpieczenie odległościowe bloku (oznaczenie ANSI: 21s). Działa ono zwykle z cztero- lub pięciostrefową charakterystyką rozruchową o poligonalnych kształtach stref. Strefy I i II omawianego zabezpieczenia skierowane są zwykle w stronę bloku, a strefy III, IV i V w stronę sieci zewnętrznej. W takiej konwencji, strefy I i II stanowią rezerwę zabezpieczeń różnicowych bloku, linii blokowej, transformatora blokowego i generatora, a strefy III - V stanowią rezerwowo zabezpieczenie chroniące blok przed skutkami zwarć w sieci zewnętrznej.

W czasie asynchronicznych kołysań mocy, trajektorie impedancji $\underline{Z}(t)$ widziane przez zabezpieczenia podimpedancyjne bloków wytwórczych mogą przechodzić z niewielką szybkością przez obszary stref rozruchowych zabezpieczeń podimpedancyjnych bloków wytwórczych. Tym samym, może dochodzić do zbędnego działania wskazanych zabezpieczeń w czasie kołysań mocy. W takiej sytuacji, na zbędne zadziałanie są najbardziej narażone strefy omawianych zabezpieczeń działające najszybciej. Zbędne działanie opisanych stref spowoduje zwykle doprowadzenie jednostki wytwórczej do stanu "pracy luzem kotła". Po osiągnięciu takiego stanu, ponowne wprowadzenie bloku do sieci (tak zwana resynchronizacja) będzie możliwe po upływie długiego czasu, potrzebnego na stwierdzenie braku zwarć w obwodach bloku², ponowne doprowadzenie turbiny do obrotów znamionowych oraz synchronizację bloku. Stwarza to ryzyko rozwinęcia się w systemie elektroenergetycznym rozległej awarii w wyniku deficytu mocy³.

² Zabezpieczenia podimpedancyjne bloków wytwórczych są rezerwowymi zabezpieczeniami (między innymi) od skutków zwarć w obwodach tych źródeł energii. W związku z tym po zadziałaniu tego typu zabezpieczeń, niezależnie czy to pożądanym czy zbędnym, obsługa bloku musi upewnić się czy zadziałanie było prawidłowe czy nie. Oznacza to szczegółową weryfikację obwodów pierwotnych bloku w poszukiwaniu miejsca zwarć, a także przegląd zapisów rejestratorów zdarzeń i zakłóceń urządzeń zabezpieczeniowych oraz rejestratorów parametrów elektrycznych. Wszystkie te działania muszą dać jednoznaczną odpowiedź na pytanie: czy zwarcie w obwodach bloku jest obecne czy miało miejsce zbędne zadziałanie zabezpieczenia podimpedancyjnego? Weryfikacja taka wymagają dużej wiedzy oraz jest czasochłonna. W czasie jej trwania blok wytwórczy nie może zostać ponownie uruchomiony.

³ Należy mieć na uwadze fakt, że asynchroniczne kołysania mocy mogą wystąpić w szczególności w stanach awaryjnych sieci, czyli wtedy gdy występowało w niej zwarcie lub wyłączone zostały kluczowe jej elementy, przez co obniżyła się jej moc zwarciowa. Stan taki sam w sobie można już uznać za awarię systemową. Jeśli podczas trwania kołysań mocy dojdzie do zbędnego wyłączenia bloku stan systemu ulegnie dalszemu pogorszeniu, ponieważ wyłączony blok nie będzie mógł zostać szybko włączony do sieci. Jeśli kilka jednostek wytwórczych zostanie w ten sposób wyłączone rośnie ryzyko powstania rozległej awarii (ang. *blackout*) skutkującej długotrwałym odcięciem odbiorców od zasilania.

Zabezpieczenia podimpedancyjne pracujące w sieci (w szczególności zabezpieczenia linii i transformatorów) również są narażone na zbędne działanie w czasie kołysań mocy.

Aby ograniczyć zagrożenie zbędnym działaniem zabezpieczeń podimpedancyjnych bloków wytwórczych oraz innych elementów sieci w czasie kołysań mocy stosuje się blokady kołysaniowe tych zabezpieczeń. Ich zadaniem jest blokowanie wybranych stref omawianych zabezpieczeń w czasie trwania kołysań mocy zagrażających im zbędnym działaniem. W czasie kołysań mocy trajektorie impedancji przemieszczają się po płaszczyźnie impedancji z ograniczoną, lecz niezerową szybkością. Natomiast, w czasie rozwijania się zwarcia przemieszczają się one skokowo z punktu obciążenia początkowego do punktu zwarcia, po czym utrzymują się w pobliżu tego punktu. W związku z tym, większość dostępnych w obecnych generacjach urządzeń zabezpieczeniowych blokad kołysaniowych wykrywa występowanie kołysań mocy w oparciu o sprawdzanie szybkości zmian mierzonej impedancji. Jeśli wyznaczona szybkość zmian impedancji jest większa od zera, lecz mniejsza od przyjętego nastawienia, algorytm blokady uznaje, że mają miejsce kołysania mocy i zablokowane zostaje działanie wybranych do tego stref rozruchowych zabezpieczenia podimpedancyjnego. Natomiast jeśli szybkość zmian impedancji będzie większa od przyjętego nastawienia, blokada uznaje, że ma miejsce zwarcie i nie doprowadza w tej sytuacji do zablokowania zabezpieczenia.

Określenie szybkości zmian impedancji przez blokady kołysaniowe odbywa się zwykle w sposób uproszczony. W najprostszymi rozwiązaniach blokad, szybkość zmian impedancji jest szacowana na podstawie czasu przejścia trajektorii impedancji pomiędzy dodatkowymi strefami (mierzony jest czas przebywania impedancji w paśmie pomiędzy dodatkowymi strefami blokady). W bardziej rozbudowanych rozwiązaniach, po wkroczeniu trajektorii impedancji do dodatkowej strefy blokady, zabezpieczenie zaczyna wyznaczać przyrosty lub pochodne impedancji i na tej podstawie wykrywa występowanie kołysań mocy.

W literaturze można też znaleźć wiele propozycji niekonwencjonalnych rozwiązań blokad kołysaniowych zabezpieczeń podimpedancyjnych, działających na różnych zasadach, często odmiennych od zasady sprawdzania szybkości zmian impedancji mierzonej przez urządzenie zabezpieczeniowe.

Nie wszystkie zabezpieczenia podimpedancyjne są wyposażone w blokady kołysankowe. Ponadto, liczne badania symulacyjne i analizy rzeczywistych awarii wskazują na występowanie zagrożeń niepoprawnej pracy dostępnych blokad kołysaniowych w specyficznych warunkach kołysań mocy. Zagrożeniem tym dotknięte są również blokady kołysaniowe zabezpieczeń podimpedancyjnych bloków wytwórczych. Niepoprawna praca blokad tych zabezpieczeń w czasie kołysań mocy może doprowadzić do zbędnego wyłączenia jednostki wytwórczej.

W ocenie autora, problematyka nieprawidłowego działania zabezpieczeń podimpedancyjnych bloków wytwórczych oraz ich blokad kołysaniowych w czasie kołysań mocy wymaga dogłębnego zbadania. W związku z tym, w książce skupiono się na zidentyfikowaniu sytuacji, w których może dochodzić do nieprawidłowego działania tych zabezpieczeń i ich blokad. Ponadto, zaproponowano niekonwencjonalny algorytm blokady kołysaniowej zabezpieczeń podimpedancyjnych bloków wytwórczych, pozwalający znacznie zmniejszyć zagrożenie zbędnym działaniem tych zabezpieczeń podczas kołysań mocy. Książka stanowi podsumowanie rozprawy doktorskiej autora.