

Wrocław, 5 lipca 2016 roku

Prof. dr inż. Marian Sobierajski

Katedra Energoelektryki

Politechniki Wrocławskiej

marian.sobierajski@pwr.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Artura Zbrońskiego

pt. "Metoda lokalizacji układów kompensatorów statycznych w systemie elektroenergetycznym"

Promotor pracy: Prof. dr hab. inż. Ryszard Zajczyk

Recenzja została wykonana w odpowiedzi na pismo z 22 czerwca 2016 r. Dziekana Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej prof. dr hab. inż. Leona Swędrowskiego,

CEL ROZPRAWY

Badanie stabilności napięciowej współczesnych systemów elektroenergetycznych polega na obserwacji zmian napięć w węzłach sieci przesyłowej w kolejnych stanach ustalonych, występujących po zmianie zapotrzebowania mocy w systemie elektroenergetycznym.

Utrata stabilności napięciowej w obszarze z deficytem mocy biernej może być spowodowana dużym wzrostem zapotrzebowania mocy w systemie, awaryjnym wyłączeniem generatorów w deficytowym obszarze lub awaryjne wyłączenie silnie obciążonej linii przesyłowej dostarczającej moc bierną do deficytowego obszaru.

Moc bierna generatora synchronicznego nie może przekroczyć ściśle określonych wartości minimalnej i maksymalnej, wynikających z wykresu kołowego mocy generatora. Maksymalna moc bierna generatora musi odpowiadać dopuszczalnemu prądowi wirnika lub stojana, a wartość minimalna (wyrażona liczbą rzeczywistą ze znakiem) - warunkom równowagi statycznej. Z chwilą, kiedy generator synchroniczny osiągnie maksymalną wartość mocy biernej, wtedy skutek działania ograniczników (prądu stojana lub wirnika), jego napięcie obniży się, co w konsekwencji, przy stałej mocy czynnej, spowoduje wzrost prądu stojana i zmniejszenie dopuszczalnej wartości wytwarzanej

mocy biernej. W tej sytuacji pozostałe generatory muszą przejąć na siebie wzrost wytwarzania mocy biernej, aż do osiągnięcia swoich wartości granicznych tej mocy.

W statycznym modelu sieci przesyłowej węzeł generatorowy z graniczną mocą bierną staje się węzłem typu PQ, czyli węzłem o zadanej mocy czynnej i biernej, zamiast węzłem o zadanej mocy czynnej i napięciu typu PU. Od tego momentu w bilansie mocy biernej w sieci przesyłowej zaczynają decydować pojemności linii i baterii kondensatorów oraz statycznych kompensatorów mocy biernej.

Trwałe obniżenie napięć w sieci przesyłowej powoduje zmniejszenie wytwarzania mocy biernej w kompensatorach statycznych zgodnie z kwadratem wartości napięcia. Z drugiej strony, straty przesyłowe mocy biernej są wprost proporcjonalne do kwadratu przesyłanych mocy i odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu napięcia. Wzrost przesyłanych mocy i obniżenie napięcia powoduje wzrost strat mocy biernej i pogłębienie deficytu mocy biernej.

Badanie zapasu stabilności napięciowej polega zwykle na dociążaniu systemu i monitorowaniu zmian napięcia w węzłach w postaci krzywych nosowych P-U. Punkt pracy, w którym iteracyjny proces obliczenia rozptywu mocy jest rozbieżny traktuje się jako punkt lawiny napięcia. Różnica obciążenia w punkcie lawiny napięcia i planowanego obciążenia określa zapas stabilności napięciowej sieci przesyłowej.

Utrata stabilności napięciowej to obecnie najczęstsze awarie systemowe na świecie. W Polsce największa awaria napięciowa miała miejsce 26 czerwca 2006 roku. Aby w przyszłości uniknąć wystąpienia lawiny napięć w Krajowym Systemie Elektroenergetycznym Operator podjął decyzje o zainstalowaniu w sieci przesyłowej 400/220/110 kV statycznych kompensatorów mocy biernej.

Wybór lokalizacji i znamionowych mocy statycznych kompensatorów jest przedmiotem recenzowanej rozprawy doktorskiej. Zatem recenzowana rozprawa mieści się w nurcie bardzo ważnych badań naukowych mających na celu poprawę bezpieczeństwa pracy systemu elektroenergetycznego.

TEZA ROZPRAWY

Z krytycznego przeglądu literatury doktorant wyciąga wniosek, że istnieje potrzeba opracowania metody korzystającej z teorii zbiorów rozmytych do optymalizacji lokalizacji i mocy znamionowej statycznych kompensatorów instalowanych w sieci przesyłowej.

Doktorant sformułował następującą tezę:

Zastosowanie teorii zbiorów rozmytych w algorytmie określania lokalizacji dodatkowych źródeł mocy biernej w systemie elektroenergetycznym pozwala na ich prawidłowy dobór oraz optymalne rozmieszczenie w sieci przesyłowej.

Tezę uważam za właściwie sformułowaną. Moim zdaniem, udowodnienie tezy może mieć znaczenie praktyczne dla obrony sieci przesyłowej przed wystąpieniem lawiny napięć w obszarach systemu elektroenergetycznego z deficytem mocy biernej.

WYKAZANIE POPRAWNOŚCI TEZY

Dowód tezy przeprowadził doktorant w kilku rozdziałach rozprawy.

W rozdziale 3 omówił zagadnienie stabilności napięciowej z punktu widzenia regulacji napięć.

W rozdziale 4 przedstawił metody optymalizacji, stosowane przy rozwiązywaniu problemów napięciowych w systemach elektroenergetycznych, w tym metody sztucznej inteligencji i metody zbiorów rozmytych.

W rozdziale 5 scharakteryzował zagadnienie lokalizacji dodatkowych źródeł mocy biernej w sieciach dystrybucyjnych i przesyłowych.

W rozdziale 6 przedstawił własny algorytm - bazujący na zbiorach rozmytych - wyznaczania lokalizacji i znamionowych mocy statycznych źródeł mocy biernej w sieci przesyłowej.

Rozdział 7 zawiera wyniki przykładowych obliczeń z wykorzystaniem autorskiego algorytmu.

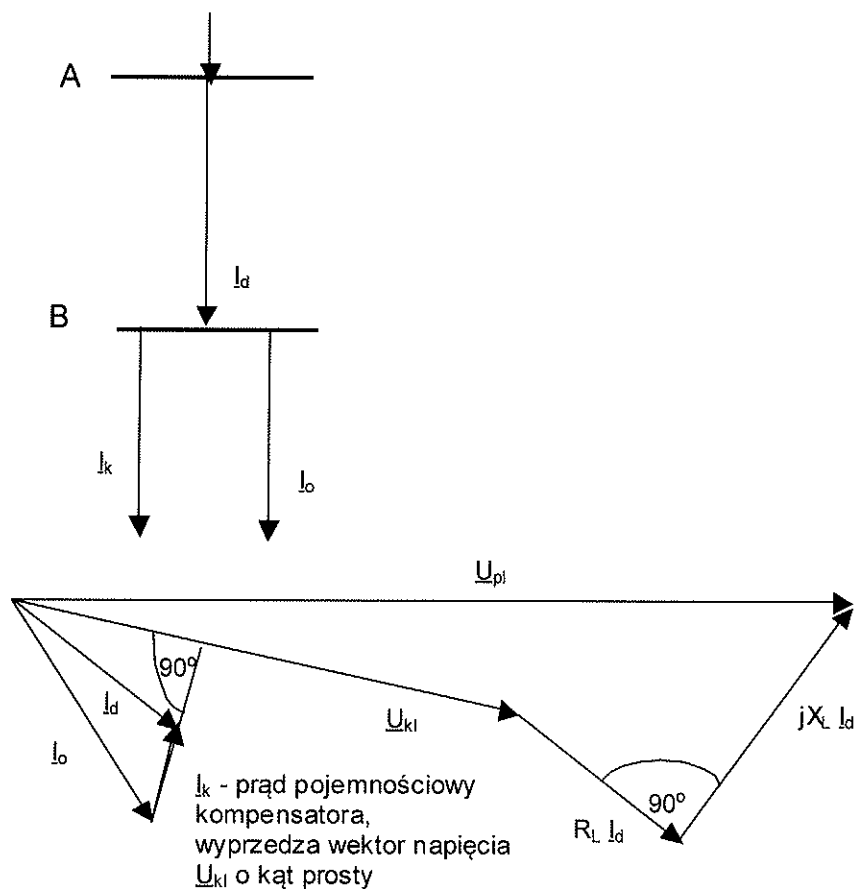
Rozdział 8 zawiera podsumowanie i wnioski końcowe.

Za oryginalny wkład doktoranta uważam:

1. Opracowanie algorytmów z wykorzystaniem teorii zbiorów rozmytych.
2. Opracowanie skryptu w języku DPL pozwalającego wykorzystać pakiet DigSILENT PowerFactory do komputerowej realizacji autorskich algorytmów.
3. Przeprowadzenie weryfikacji zaproponowanych algorytmów na przykładzie rozszerzonego systemu CIGRE.

UWAGI MERYTORYCZNE

1. W rozdziale 3.2 doktorant omawiając zagadnienie kompensacji mocy biernej nieprawidłowo ilustruje zasadę działania kompensatora mocy biernej.

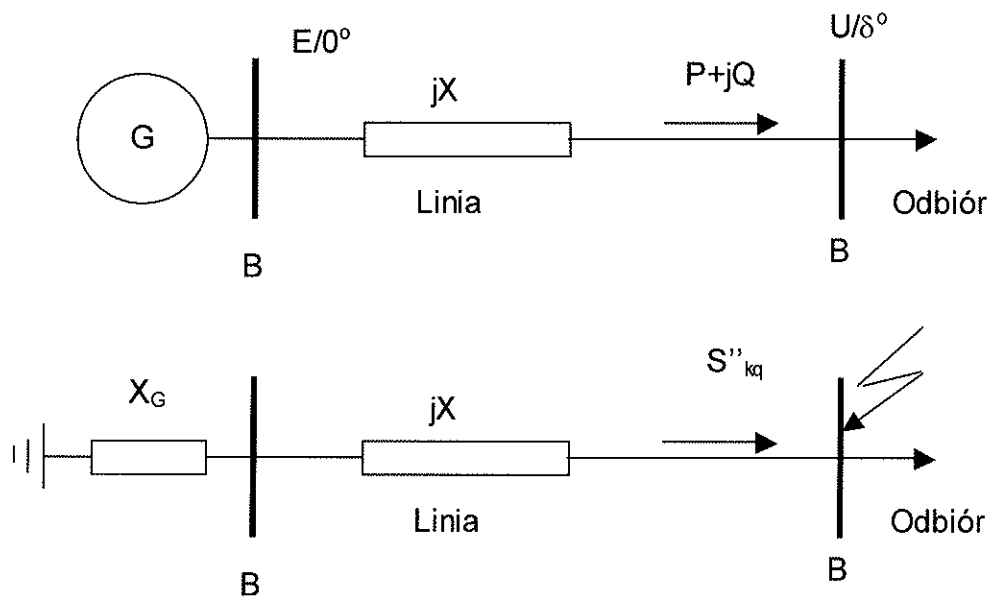


Rys. 3.2. Poprawne wykresy wektorowe napięć i prądów przy kompensatorze zainstalowanym w węźle B.

Teoria obwodów elektrycznych definiuje kąt mocy jako kąt między wektorem prądu i wektorem napięcia w tym samym węźle obwodu elektrycznego, przy wirowaniu obu wektorów przeciwnie do ruchu wskazówek zegara.

Zgodnie z teorią obwodów, z punktu widzenia odbioru, wektor prądu pojemnościowego wyprzedza o kąt 90 stopni wektor napięcia na końcu linii, czyli w węźle odbioru. Tymczasem doktorant pokazuje na Rys. 3.2, że jest to kąt 90 stopni między wektorem prądu odbioru i wektorem napięcia na początku linii, zamiast na końcu linii.

2. W rozdziale 3.4, omawiając stabilność napięciową doktorant wadliwie definiuje moc zwarciovą węzła odbiorczego. Wyjaśnić to można rozważając schemat zastępczy układu pokazanego w rozprawie doktorskiej na Rys. 3.4.



Rys. 3.4. Uzupełnienie rysunku o schemat zastępczy.

Moc zwarciova w węzle B wynika z reaktancji Thevenina widzianej z węzła B

$$I_k'' = \frac{cU_{NB}}{\sqrt{3} X_{\text{Thevenina}}} \quad \text{- prąd zwarciovy początkowy w węzle odbioru B,}$$

czyli

$$S_{kq}'' = \sqrt{3}U_{NB} I_k'' = \sqrt{3}U_{NB} \frac{cU_{NB}}{\sqrt{3} X_{\text{Thevenina}}} = \frac{cU_{NB}^2}{X_{\text{Thevenina}}} \quad \text{- moc zwarciova w węzle B}$$

gdzie

$$X_{\text{Thevenina}} = X_G + X_L \quad \text{- reaktancja Thevenina.}$$

Generacja zewnętrzna G może pochodzić, albo od generatora synchronicznego

$$X_G = x_d'' \frac{U_{NG}^2}{S_{NG}}$$

albo od minimalnej mocy zwarciovej systemu zewnętrznego

$$X_G = \frac{cU_{NB}^2}{S_Q''}$$

Analizę stabilności napięciowej w wybranym węźle odbiorczym systemu elektroenergetycznego odnosi się do najłagodniejszych warunków napięciowych, czyli do najmniejszej mocy zwarciowej, co odpowiada jedynkowej wartości współczynnika zwarciowego $c=1$.

Wzór podany przez doktoranta można by traktować jako słuszny wtedy i tylko wtedy, gdyby system zewnętrzny miał nieskończenie wielką moc zwarciową

$$X_G = \frac{cU_{NB}^2}{S_Q} = \frac{cU_{NB}^2}{\infty} = 0, X_{Thevenina} = X_G + X_L = 0 + X_L = X_L$$

Przyjęcie nieskończenie wielkiej mocy zwarciowej systemu, z którego zasilany jest odbiór jest sprzeczne z zasadami badania stabilności napięciowej układów przesyłowych.

Podane w rozdziale 3.4 wzory byłyby poprawne, gdyby doktorant na Rys. 3.4 zamiast reaktancji linii podał reaktancje Thevenina widzianą z węzła odbioru B.

3. Moim zdaniem rozdział 3.4 został zredagowany niestarannie. Przede wszystkim, brakuje sformułowania założeń, przy których wyprowadzone zostały wzory.

Zgodnie z teorią obwodów elektrycznych przyjmuje się, że prądy dopływające do węzła są wyróżniane znakiem plus, a odpływające od węzła - znakiem minus.

Doktorant stosuje odwrotne oznakowanie, nie tłumacząc dlaczego tak postępuje.

4. W rozdziale 3.4, nieoczekiwanie we wzorze (3.9) pojawia się zmienna V nigdzie nie zdefiniowana. Czy jest to zmienione oznaczenie napięcia odbioru, $U=V$?

5. Brakuje przekształceń wzorów (3.7) i (3.8) do postaci zależności (3.12). Trudno zatem zweryfikować, czy wzór (3.12) jest poprawny. Powstaje pytanie, dlaczego doktorant nie doprowadził tego wzoru do prostszej postaci i nie wykorzystał tożsamości trygonometrycznej

$$\sin \varphi \cos \varphi = \frac{1}{2} \sin 2\varphi$$

We wzorze (3.12) pojawia się wielkość oznaczana jako mała litera p . Jest to moc czynna odbioru w jednostkach względnych odniesionych do mocy zwarciowej węzła odbiorczego $p = \frac{P}{S_{kq}''}$. Pojawia się również wielkość $v = \frac{V}{E}$, oznaczająca napięcie węzła odbiorczego w jednostkach względnych odniesionych do sem E . Dlaczego w takim razie krzywe nosowe mają opis $P(U)$?

6. W rozdziale 6.1. w opisie algorytmu w kroku 5^o doktorant stwierdza, że zapisywane są wyniki podatności napięciowej $\frac{dU_k}{dP_k}$. Czy symbol P_k oznacza węzłową moc czynną odbioru, czy też zmieniany w algorytmie inny parametr? Jeżeli jest to moc czynna, to czy jest wyrażona w jednostkach względnych odniesionych do mocy zwarciowej w węźle k ?

$$\frac{dU_k}{dP_k} = \frac{d(v_k E_k)}{d(p_k S_{kq}'')} = ?$$

Powyższe uwagi merytoryczne nie umniejszają osiągnięć doktoranta. Uważam, że osiągnięcia te są znaczące i inspirujące do dalszych badań.

UWAGI SZCZEGÓŁOWE

Z punktu widzenia czytelnika zasadniczą wadą rozprawy doktorskiej jest brak listy zdefiniowanych użytych w tekście rozprawy.

Na pochwałę zasługuje trafnie dobrany materiał ilustracyjny opisujący efektywność opracowanego algorytmu.

PODSUMOWANIE

1. Recenzowana praca dotyczy bardzo ważnego zagadnienia dotyczącego zapobiegania utracie stabilności napięciowej.
2. Doktorant opracował i zweryfikował algorytm wyboru lokalizacji oraz mocy znamionowych statycznych kompensatorów mocy biernej w sieci przesyłowej, z wykorzystaniem zbiorów rozmytych.
3. Materiał zawarty w rozprawie, sposób jego prezentacji, własne przemyślenia wskazują na dobre rozeznanie doktoranta w teoretycznych i praktycznych zagadnieniach zapobiegania utracie stabilności napięciowej we współczesnych systemach elektroenergetycznych.
4. Uważam, że doktorant rozwiązując postawione zadanie wykazał się dobrą znajomością zagadnień związanych ze stabilnością napięciową systemów elektroenergetycznych oraz umiejętnością samodzielnego definiowania i rozwiązywania skomplikowanych problemów badawczych.

WNIOSEK KOŃCOWY

Stwierdzam, że recenzowana praca spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytułach naukowych i wnoszę o dopuszczenie mgr inż. Artura Zbrońskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Prof. dr hab. inż. Marian Sobierajski

