

Badanie wpływu działania przełącznika zacze­pów transformatora na stabilność napięciową

Streszczenie. Artykuł dotyczy wpływu działania przełącznika zacze­pów na wartość napięcia strony wtórnej transformatora oraz zapas stabilności napięciowej węzła odbiorczego. Na wstępie przedstawiono podstawowe informacje dotyczące stabilności napięciowej oraz przełącznika zacze­pów. Wartość napięcia strony wtórnej transformatora może być regulowana wykorzystując przełącznik zacze­pów. Regulacja ta powoduje również modyfikację parametrów modelu Thevenina widzianego z zacisków wtórnych. Zmiany tych parametrów odzwierciedlają zmiany warunków stabilności napięciowej. Przeprowadzono analizy symulacyjne tego wpływu a wybrane wyniki zaprezentowano w artykule.

Abstract. The paper concerns influence of transformer tap changer regulation on secondary voltage level and voltage stability margin of receiving node. At the beginning there are presented general information about voltage stability and tap changer. Voltage value of secondary terminals of transformer can be regulated using tap changer. This regulation also affects the calculation of Thevenin equivalent parameters seen from the secondary terminals. Changes of equivalent parameters cause a change of voltage stability conditions. Simulation studies of this influence have been done. Selected results are presented in the paper. (**Analysis of influence of transformer tap changer operation on voltage stability**).

Słowa kluczowe: stabilność napięciowa, przełącznik zacze­pów transformatora.

Keywords: voltage stability, transformer tap changer.

doi:10.12915/pe.2014.03.18

Wstęp

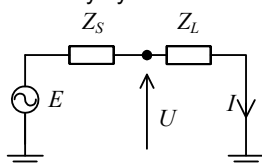
Energia elektryczna dostarczana do odbiorców powinna posiadać odpowiednią jakość. Wymagane parametry jakości zdefiniowane są w standardzie EN 50160 [1]. Jednym z parametrów jest wartość napięcia zasilania. Wahania tej wartości mogą być powodowane przez normalne działanie systemu elektroenergetycznego – zmiany konfiguracji lub parametrów obciążeń. W celu zapewnienia odpowiedniej wartości napięcia niektóre węzły systemu powinny posiadać regulację. Regulacja ta, co jest oczywiste, wpływa również na parametry punktu pracy węzła systemu.

Najczęściej stosowanymi metodami regulacji są: przełączniki zacze­pów transformatora, kompensacja mocy biernej oraz podnapięciowe odciażanie. Artykuł dotyczy jedynie analizy wpływu działania przełącznika zacze­pów transformatora na wartość napięcia oraz stabilność napięciową.

Definicja stabilności napięciowej, jaką można znaleźć w publikacjach IEEE brzmi następująco: „Stabilność napięciowa jest zdolnością systemu utrzymania napięcia, tak że kiedy admitancja obciążenia rośnie jednocześnie rośnie moc obciążenia, więc obie wartości są kontrolowalne” [2].

Zapas stabilności napięciowej może być określony wykorzystując pełny model systemu oraz obliczenia rozptyłów mocy. Uwzględniając charakterystyki napięciowe obciążeń możliwe jest obliczenie zapasu stabilności napięciowej każdego z węzłów. Do tego celu można zastosować obliczenie zmian parametrów pracy węzła na skutek zmian napięcia np. dQ/dU [3,4].

W celu zbadania stabilności napięciowej wybranego węzła systemu elektroenergetycznego wygodniejsze wydaje się wykorzystanie uproszczonego modelu Thevenina. W takim modelu część systemu widziana z rozpatrywanego węzła może zostać zastąpiona przez idealne źródło napięciowe E połączone szeregowo z impedancją systemową Z_S (Rys. 1). Parametry te reprezentują stan ustalony systemu.



Rys. 1. Model Thevenina

Parametry punktu pracy obwodu Thevenina mogą być opisane następującymi wzorami [5]:

$$(1) \quad U = \frac{E}{\sqrt{1 + W^2 + 2W \cos \beta}}$$

$$(2) \quad S = \frac{E^2 W}{Z_S (1 + W^2 + 2W \cos \beta)}$$

Gdzie: U – napięcie, S – moc pozorna, $W = Z_S / Z_L$, Z_S i Z_L – impedancja systemowa oraz obciążenia, $\beta = \varphi_S - \varphi_L$, φ_S i φ_L – kąt impedancji systemowej i obciążenia.

Granica stabilności napięciowej występuje w punkcie maksymalnego przesytu mocy do węzła [6]. W punkcie tym jest spełniony warunek (3). W analizach wprowadzono współczynnik zapasu stabilności opisany równaniem (4) oraz parametr $W = Z_S / Z_L$.

$$(3) \quad |\bar{Z}_S| = |\bar{Z}_L|$$

$$(4) \quad \Delta W = 1 - W = 1 - \frac{|\bar{Z}_S|}{|\bar{Z}_L|}$$

Podczas stabilnej pracy wartość impedancji obciążenia jest większa od impedancji systemowej, więc wartość W będzie się zmieniała od 0 do 1.

W literaturze można znaleźć metody estymacji wartości W . Metody te wykorzystują lokalne pomiary prądów i napięć. Przykładowo parametr ten może zostać obliczony wykorzystując: równania modelu Thevenina [6], pochodną mocy pozornej po napięciu dS/dU [7] lub napięcia po admitancji obciążenia dU/dY [8].

Przełącznik zacze­pów transformatora

W celu regulacji napięcia strony wtórnej transformatora, wydzielone zwoje jednego z uzwojeń dołączone muszą być do przełącznika zacze­pów. Przełącznik montowany jest najczęściej po stronie pierwotnej. Działanie przełącznika zmienia liczbę aktywnych uzwojeń, co przy stałej liczbie zwojów strony wtórnej powoduje zmianę przekładni.

Rozróżnia się regulację: w stanie beznapięciowym (ang. DETC) oraz pod obciążeniem (ang. LTC) [9]. Regulacja beznapięciowa stosowana jest w przypadku węzłów, w

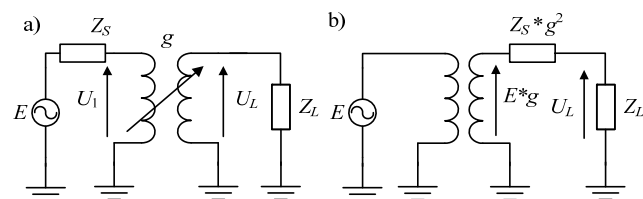
których potrzeba regulacji napięcia występuje stosunkowo rzadko. Jeśli potrzeba ta pojawia się często stosowana jest regulacja pod obciążeniem.

Możliwe jest uwzględnienie przełącznika zaczeów w modelu Thevenina (Rys. 1). Przedstawiono to na rysunku 2. W modelu tym straty poprzeczne oraz podłużne transformatora zostały pominięte. Wartość napięcia strony wtórnej zależy od położenia przełącznika zaczeów g zgodnie ze wzorem:

$$(5) \quad g = \frac{U_L}{U_1}$$

W celu uproszczenia, parametry Thevenina mogą być przeliczone na poszczególne strony transformatora. Impedancja systemowa Z_S oraz źródło napięciowe E mogą być przeliczone na stronę wtórną zgodnie ze wzorami (6). Rysunek 2b przedstawia model Thevenina z uwzględnieniem przeliczenia parametrów.

$$(6) \quad Z_S' = Z_S * g^2 \quad E' = E * g$$



Rys. 2. Model Thevenina z przełącznikiem zaczeów

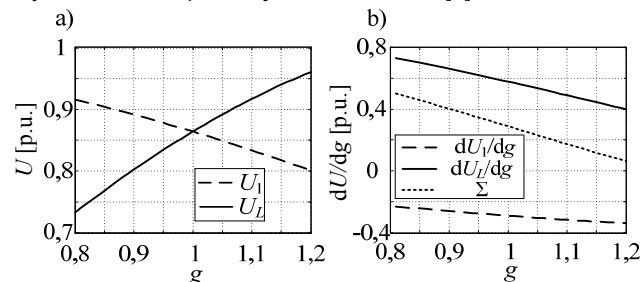
Uwzględniając przekładnię g w równaniu (1), napięcie strony wtórnej U_L może być opisane w następujący sposób:

$$(7) \quad U_L = \frac{Eg}{\sqrt{1 + (Wg^2)^2 + 2Wg^2 \cos \beta}}$$

Z równań (5) i (7) wynika wzór mogący służyć do obliczenia napięcia strony pierwotnej:

$$(8) \quad U_1 = \frac{U_L}{g} \frac{E}{\sqrt{1 + (Wg^2)^2 + 2Wg^2 \cos \beta}}$$

Zmiana pozycji przełącznika zaczeów wpływa na zmianę napięcia strony pierwotnej oraz wtórnej transformatora. Gdy współczynnik g rośnie, zwiększa się napięcie wtórne a maleje pierwotne. Rysunek 3 przedstawia przykład tej zależności. Krzywe wykreślono dla parametrów wynoszących: $E=1$; $W=0,3$; $\varphi_{ZS}=85^\circ$; $\varphi_{ZL}=15^\circ$. Pochodne napięcia pierwotnego i wtórnego po zmianie parametru g oraz suma tych pochodnych przedstawione są na rysunku 3b. Pomiar pochodnych napięć po zmianie przełącznika zaczeów może być użyte, jako kryterium blokowania działania przełącznika. Blokada powinna wystąpić, kiedy zmiana przełącznika nie przynosi zamierzonych efektów. Kryterium takie opisane jest w literaturze [8].



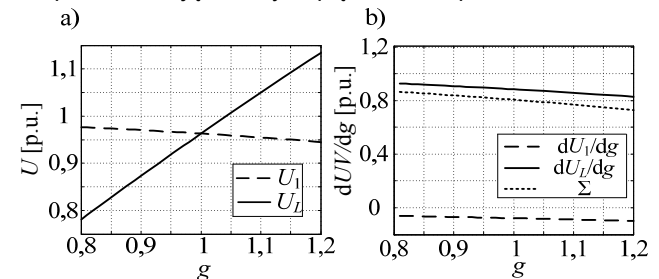
Rys. 3. Zmiany napięć transformatora $W=0,3$; $\beta=70^\circ$

Przełącznik zaczeów powinien zostać zablokowany, kiedy suma pochodnych jest równa zero. Działanie przełącznika dozwolone jest, gdy warunek (9) jest spełniony. Gdy suma pochodnych jest mniejsza od zera, zmiana przekładni powoduje większy spadek napięcia pierwotnego niż przyrost wtórnego. W takim przypadku rozsądne jest blokowanie przełącznika.

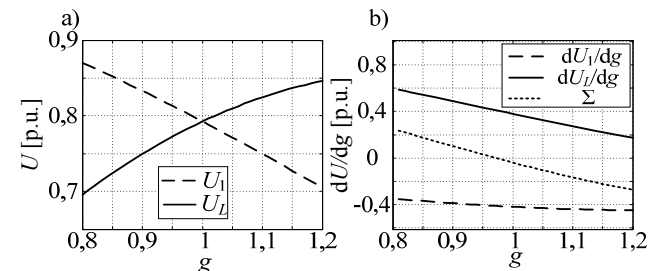
$$(9) \quad \frac{dU_L}{dg} + \frac{dU_1}{dg} > 0$$

Wyniki symulacji

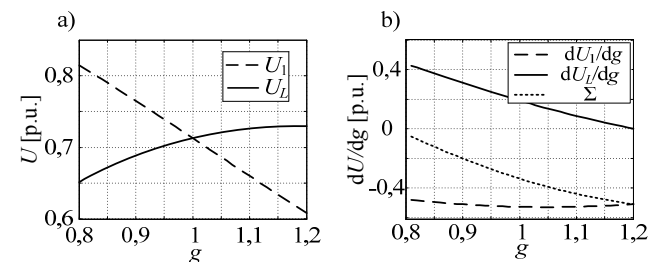
W celu wykonania analiz wpływu działania przełącznika zaczeów na zmianę napięcia strony pierwotnej oraz wtórnej przyjęto następujące parametry modelu Thevenina: $E=1$; $|Z_S|=1$; $\varphi_{ZS}=85^\circ$. Kąt impedancji obciążenia tak jak w poprzednim przykładzie wynosił 15° , więc kąt $\beta=70^\circ$. Symulacje wykonano dla różnych wartości impedancji obciążenia. Parametr W wynosił: 0,1; 0,3; 0,5 i 0,7. Rysunki 3-6 przedstawiają zmiany napięć oraz ich pochodne.



Rys. 4. Zmiany napięć transformatora $W=0,1$; $\beta=70^\circ$



Rys. 5. Zmiany napięć transformatora $W=0,5$; $\beta=70^\circ$

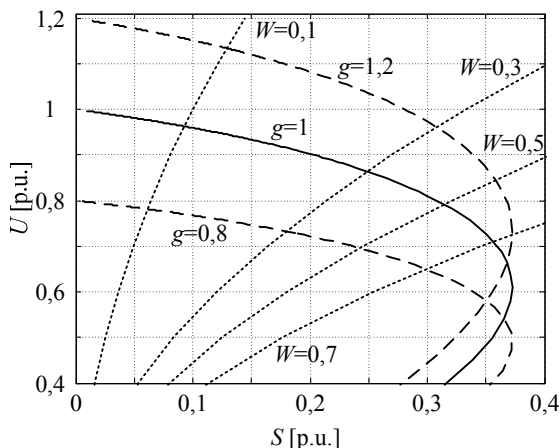


Rys. 6. Zmiany napięć transformatora $W=0,7$; $\beta=70^\circ$

Analizując przedstawione wykresy można zauważyć, iż nachylenie przebiegu zmian napięcia zależy od współczynnika W . Dla małych wartości tego parametru (Rys. 4) regulacja napięcia strony wtórnej U_L nie powoduje znacznego spadku napięcia pierwotnego U_1 . Pochodna napięcia wtórnego dU_L/dg jest większa a pochodna dU_1/dg mniejsza od zera. W całym zakresie działania przełącznika $g=0,8:1,2$ suma tych pochodnych będzie dodatnia, więc warunek (9) będzie spełniony. Również dla $W=0,3$ (Rys. 3) w zakresie działania suma pochodnych nie osiąga zera jednak zbliżając się do końca zakresu jest bliska tej wartości. W tym przypadku blokada działania nie powinna wystąpić. Przy zadanej wartości $W=0,5$ (Rys. 5) suma pochodnych osiąga zero dla $g=0,97$. Gdy przełącznik

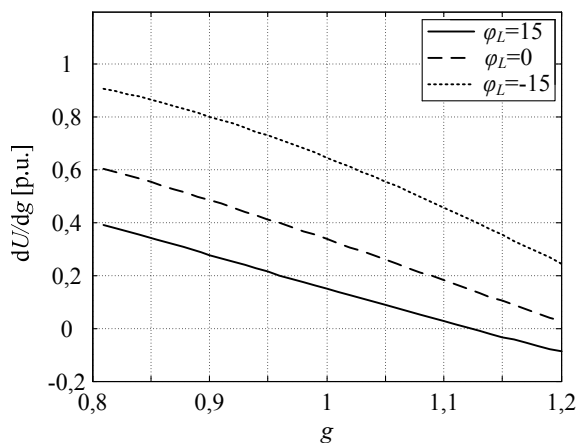
zaczepów jest w neutralnej pozycji $g=1$ i wystąpi taka wartość współczynnika W , każda regulacja napięcia wtórnego powoduje znaczny spadek napięcia pierwotnego. Regulacja taka jest nieefektywna. Dla $W=0,7$ (Rys. 6) regulacja nie jest efektywna w całym zakresie regulacji.

Różny stopień zmian pochodnych dla poszczególnych wartości W wynika z różnego wzrostu napięcia oraz mocy pozornej. Poszczególne przykłady pokazano na rysunku 7. Linia ciągłą oznaczono krzywą nosową dla $g=1$. Przerwane linie odpowiadają wartościom $g=0,8$ i $g=1,2$. Charakterystyki obciążenia oznaczono linią kropkowaną. Rysunek ten pokazuje, iż dla wzrostu początkowego parametru W przyrost napięcia wtórnego powodowany regulacją przełącznika zmniejsza się a przyrost mocy rośnie.



Rys. 7. Krzywe nosowe i charakterystyki obciążenia

Zmiany napięcia U_1 oraz U_L zależą również od kąta impedancji obciążenia. Dla kątów bliskich zeru lub ujemnych (obciążenie pojemnościowe) początkowy spadek napięcia jest mniejszy, przez co regulacja przynosi lepsze efekty w stosunku do obciążeń indukcyjnych. Rysunek 8 pokazuje sumę pochodnych dla współczynnika $W=0,4$ i trzech wartości kąta. W całym zakresie regulacji blokowanie powinno wystąpić jedynie dla kąta wynoszącego $\varphi_{ZL}=15^\circ$.

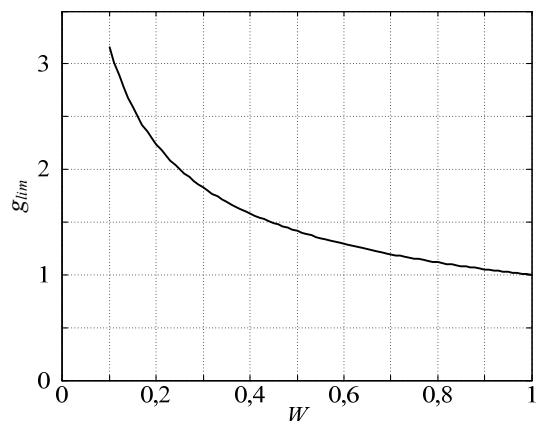


Rys. 8. Suma pochodnych dla różnych kątów obciążenia

Zakładając, że granica stabilności występuje, gdy $W=1$ oraz uwzględniając wpływ przełącznika zaczepów na impedancję Z_S , można zapisać równanie (10). Z tego równania wynika równanie (11), które umożliwia obliczenie wartości g_{lim} , dla której układ znajdzie się na granicy stabilności. Zmiany wartości g_{lim} w zależności od W przedstawiono na rysunku 9.

$$(10) \quad W = W_1 * g^2 = 1$$

$$(11) \quad g_{lim} = \frac{1}{\sqrt{W_1}}$$



Rys. 9. Zmiany g_{lim} w zależności od W

Wartości g_{lim} są większe od tych wynikających z kryterium porównania pochodnych. W prezentowanym przykładzie dla $W=0,5$ blokada powinna nastąpić dla $g=1,125$ (Rys. 5). Dla tej wartości W parametr $g_{lim}=1,4$ (Rys. 9). Potwierdza to słuszność kryterium pochodnych jednak pomiędzy wartością g wynikającą z kryterium oraz g_{lim} istnieje obszar gdzie regulacja może być wykonywana.

Obciążenie nieliniowe

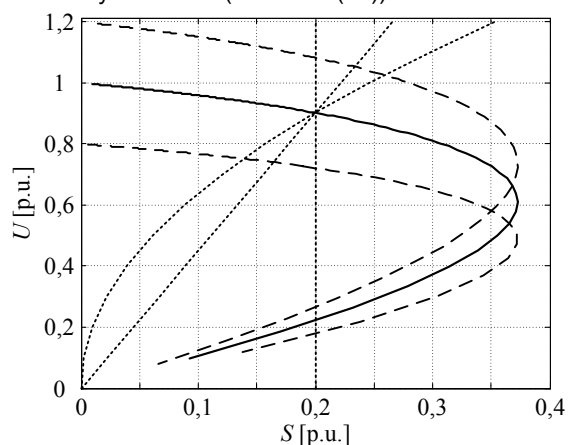
Poprzednie analizy prowadzono zakładając liniowość impedancji obciążenia. Jednakże wartość tej impedancji bardzo często zależy od poziomu napięcia. Przykładowe zależności przedstawione są w publikacjach IEEE [9].

Najprostszym sposobem opisu obciążenia nieliniowego jest model wykładniczy (równanie (12))

$$(12) \quad Z_L = Z_{L0} \left(\frac{U}{U_0} \right)^\alpha$$

Gdzie: Z_{L0} – znamionowa impedancja, α – wykładnik charakterystyki.

Przykłady podstawowych modeli (stałej impedancji, prądu i mocy) przedstawiono na rysunku 10. Zmiany napięcia i mocy są różne dla poszczególnych modeli. Można założyć, więc że wpływ regulacji przełącznika będzie zależał od wykładnika α (równanie (12)).



Rys. 10. Krzywe nosowe i charakterystyki obciążenia

Przy stałych parametrach modelu Thevenina, wartość W zależy jedynie od impedancji obciążenia. Nieliniowa impedancja obciążenia będzie się zmieniać w zależności od

wartości napięcia wtórnego. Przeliczając impedancję obciążenia na stronę pierwotną oraz uwzględniając jej zależność od napięcia otrzymuje się równanie (13).

$$(13) \quad W_1 = \frac{Z_S}{Z_L} = \frac{Z_S}{Z_{L0} \frac{(U_1 g_1)^\alpha}{g_1^2}}$$

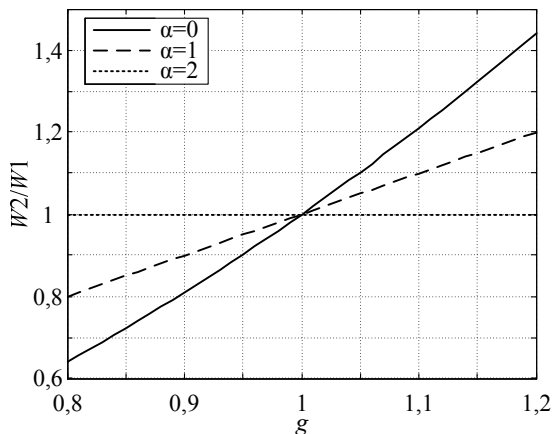
Gdzie: $U_1 = U_1/U_0$, U_0 – napięcie znamionowe.

Parametr W w znacznym stopniu zależy od pozycji przełącznika zaczeów g . Równanie (13) może również zostać zapisane dla innej pozycji g_2 . Przyrównując oraz przekształcając te równania możliwe jest obliczenie współczynnika W_2/W_1 z równania (14). Parametr ten odzwierciedla zmianę W w zależności od g dla różnych wykładników α .

$$(14) \quad \frac{W_2}{W_1} = \left(\frac{g_2}{g_1} \right)^{2-\alpha}$$

Zmiany W_2/W_1 w zależności od wartości g dla podstawowych modeli obciążenia przedstawiono na rysunku 11. Można zauważyć, że większy przyrost W występuje dla mniejszych wartości wykładnika α . Największy przyrost występuje dla modelu impedancyjnego a najmniejszy dla stałomocowego. Jest to spowodowane różnym wzrostem mocy pozornej (zbliżania się do granicy stabilności). W przypadku modelu stałomocowego regulacja przełącznika zaczeów powoduje jedynie zmianę napięcia.

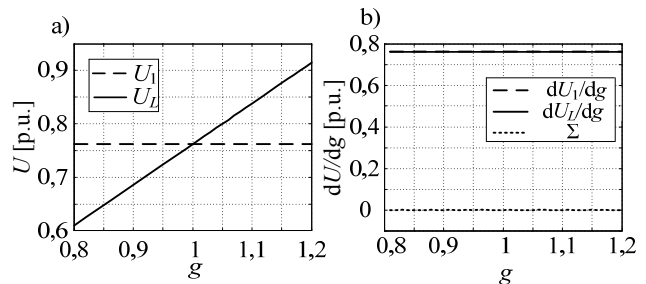
W modelu tym w celu przeliczenia impedancji obciążenia na stronę pierwotną wartość impedancji powinna być podzielona przez g^2 . Wartość impedancji w modelu stałomocowym zależy od kwadratu napięcia wtórnego, które zależy od g . Z tego powodu współczynnik W nie ulega zmianie.



Rys. 11. Zmiany W_2/W_1 w zależności od g

Dodatkowe symulacje, podobne do tych pokazanych w poprzednim punkcie, przeprowadzono dla modelu stałomocowego. W celu wykonania analizy modelu nieliniowego wykorzystano iteracyjny algorytm Aitkena [10].

Podniesienie g powoduje wzrost napięcia wtórnego przy braku zmian napięcia pierwotnego (Rys. 12). Pochodna napięcia pierwotnego jest zerowa a napięcia wtórnego dodatnia, dlatego suma nigdy nie osiągnie zera. Dla modelu stałomocowego regulacja przełącznika zaczeów może być prowadzona w całym zakresie bez względu na wartość W oraz kąt obciążenia.



Rys. 12. Zmiany napięć transformatora $W=0,3$; $\beta=70^\circ$ - model stałomocowy

Wnioski

Dla każdej wartości W możliwe jest obliczenie granicznej wartości g_{lim} . Parametr ten określa wartość, przy której układ utraci stabilność. W artykule wartość ta obliczana była zakładając liniowość impedancji obciążenia. Dla innych modeli wartość ta będzie najprawdopodobniej mniejsza, co spowoduje powstanie zapasu bezpieczeństwa.

Możliwe jest blokowanie przełącznika zaczeów wykorzystując cytowane kryterium [8]. Punkt blokowania wyznaczany jest poprzez pomiar pochodnych napięć w zależności od zmian przełącznika. Punkt ten określany jest z zachowaniem marginesu bezpieczeństwa, ponieważ wartości graniczne g_{lim} są większe od tych wynikających z kryterium. Pomiędzy nimi jest obszar gdzie możliwe jest prowadzenie regulacji z zachowaniem zapasu stabilności.

Efekt regulacji przełącznika zależy od modelu obciążenia. W artykule przedstawiono zależność skutków regulacji od wykładnika modelu nieliniowego.

LITERATURA

- [1] CENELEC, EN 50160:2010, Voltage characteristics of electricity supplied by public electricity networks
- [2] Begovic M., Fulton D., Gonzales M.R., et al., Summary of System protection and voltage stability, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, Issue: 2, Apr. 1995, s. 631-638
- [3] Kremens Z., Sobierajski M., Analiza systemów elektroenergetycznych, WNT Warszawa 1996,
- [4] Machowski J., Bialek J.W., Bumby J.R., Power system dynamics: stability and control, Second edition, John Wiley & Sons, Ltd., 2008, ISBN 978-0-470-72558-0
- [5] Wiszniewski A., New Criteria of Voltage Stability Margin for the Purpose of Load Shedding, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 22, Issue: 3, s. 1367-1371, July 2007
- [6] Yu K., Begovic M.M., Novosel D., Saha M.M., Use of Local Measurements to Estimate Voltage Stability Margin, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 14, No. 3, s. 1029-1035, August 1999
- [7] Brusilowicz B., Rebizant W., Szafran J., A new method of voltage stability margin estimation based on local measurements, APAP 2011 Conference, Beijing, No. 1790, s. 2443-2447
- [8] Wiszniewski A., Rebizant W., Klimek A., Intelligent Voltage Difference Control Maintaining the Voltage Stability Limit, Proceedings of the 43th CIGRE Session, Paris, France, paper B5_107_2010, August 2010
- [9] IEEE Task Force on Load Representation for Dynamic Performance, Load Representation for Dynamic Performance Analysis, IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 2, May 1993
- [10] Rosołowski E., Komputerowe metody analizy elektromagnetycznych stanów przejściowych, Oficyna Wydawnicza PWR., Wrocław 2009

Autorzy: dr inż. Bartosz Brusilowicz, E-mail: bartosz.brusilowicz@pwr.wroc.pl; prof. dr hab. inż. Janusz Szafran, E-mail: janusz.szafran@pwr.wroc.pl; Politechnika Wrocławska, Instytut Energoelektryki, Wybrzeże Wyspińskiego 27, 50-370 Wrocław, Polska,