

Nr 98/2017, 100–108
ISSN 1644-1818
e-ISSN 2451-2486

STABILNOŚĆ NAPIĘCIOWA A REGULACJA NAPIĘCIA PRZEŁĄCZNIKAMI ZACZEPÓW TRANSFORMATORA ELEKTROENERGETYCZNEGO

VOLTAGE STABILITY AND CONTROL TAP CHANGER OF POWER TRANSFORMER

Jarosław Korpikiewicz^{1*}, Piotr Mysiak²

Akademia Morska w Gdyni, Morska 81–87, 81-581 Gdynia, Wydział Elektryczny

¹ Studium Doktoranckie, e-mail: j.korpikiewicz@we.am.gdynia.pl

² Katedra Automatyki Okrętowej, e-mail: p.mysiak@we.am.gdynia.pl

* Adres do korespondencji/Corresponding author

Streszczenie: W artykule przedstawiono podstawowe pojęcia związane ze stabilnością napięciową węzła sieci. Przeanalizowano wpływ regulacji przełącznika zacze-
pów transformatora na stabilność napięciową. Opracowano wytyczne dla regulatora przełącznika zacze-
pów ze względu na krytyczne możliwe obniżenie się zapasu stabilności napięciowej.

Słowa kluczowe: stabilność napięciowa, podobciążeniowy przełącznik zacze-
pów, regulacja napięcia, regulatory, system elektroenergetyczny.

Abstract: The paper presents the basic concepts associated with the stability of the voltage.
The influence of regulating transformer on the voltage stability. Developed guidelines for
the regulator tap changer due to a critical decrease in the supply voltage stability.

Keywords: voltage stability, OLTC, voltage regulation, regulators, electric power system.

1. WSTĘP

W sieciach elektroenergetycznych napięcie jest regulowane praktycznie na wszystkich poziomach głównie przez generatory z układem wzbudzenia, transformatory z podobciążeniowym przełącznikiem zacze-
pów oraz kompensatory. Ważnym aspektem działania sieci elektroenergetycznej jest jej stabilna praca. Jedną z form jej oceny jest stabilność napięciowa. W artykule przeanalizowano wpływ regulacji napięcia przełącznikami zacze-
pów w stacjach GPZ na stabilność napięciową oraz opracowano wskazówki do syntezy regulatora transformatora.

2. UKŁADY REGULACJI NAPIĘCIA W SIECI ELEKTROENERGETYCZNEJ

Zadania układów regulacji napięcia w stanach ustalonych można sformułować następująco [Machowski 2007]:

- A) Zapewnienie prawidłowych wartości napięć węzłów w dopuszczalnych zakresach przy zmianach obciążenia/generacji. Gwarantuje to poprawną, stabilną pracę instalacji, urządzeń odbiorców oraz urządzeń wytwórczych, przesyłowych i rozdzielczych. Zbyt niskie lub zbyt wysokie napięcie może powodować wadliwą ich pracę oraz skrócenie czasu eksploatacji. Wartość i kształt napięcia stanowią podstawowy parametr jakości energii elektrycznej. Wymaganie to powinno być spełnione przy nieprzeciążaniu żadnego elementu sieci. Nie we wszystkich węzłach przyłącza się sterowane źródła mocy biernej. Ponadto źródła te mają ograniczony dopuszczalny zakres mocy biernej od indukcyjnej do pojemnościowej, zależny od generowanej mocy czynnej. Ww. ograniczenia można opisać układem równań (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \forall_{i \in \Omega} V_{\min}(i) \leq V(i) \leq V_{\max}(i) \\ \forall_{j \in \Theta} S(j) \leq S_{\max}(j) \\ \forall_{k \in \Psi, \Psi \subset \Omega} Q_{\min}(k, P(k)) \leq Q(k) \leq Q_{\max}(k, P(k)) \end{array} \right. \quad (1)$$

gdzie:

- i – numer węzła,
- Ω – zbiór węzłów sieci,
- Ψ – zbiór węzłów ze sterowanym źródłem mocy biernej, będący podzbiorem Ω ,
- $V_{\min}(i)$ – dopuszczalne minimalne napięcie węzła i ,
- $V_{\max}(i)$ – dopuszczalne maksymalne napięcie węzła i ,
- $V(i)$ – napięcie węzła i ,
- j – numer elementu sieci (linii),
- $S(j)$ – aktualne obciążenie elementu j ,
- $S_{\max}(j)$ – obciążalność elementu j ,
- Θ – zbiór elementów badanej sieci,
- $P(k)$ – moc czynna źródła w k -tym węźle,
- $Q(k)$ – aktualna moc bierna w węźle k ,
- $Q_{\min}(k, P(k)), Q_{\max}(k, P(k))$ – minimalna i maksymalna dostępna moc bierna dostępna w węźle k , zależna od $P(k)$.

- B) Zmniejszenie strat sieciowych. Poziomy napięć w poszczególnych węzłach zależą od wartości mocy biernych w węźle przy wymaganych mocach czynnych i stanie węzłów sąsiednich. Poziomy napięć w poszczególnych węzłach determinują przepływy mocy czynnych i biernych poszczegól-

nych linii. Zwiększenie przepływu mocy biernej w dowolnym elemencie sieci skutkuje wzrostem wartości skutecznej przepływającego przez ten element prądu. To powoduje wzrost strat mocy czynnej. Istnieje wiele kombinacji wartości mocy biernych poszczególnych węzłów, dla których nie ma przekroczeń podanych zależnością (1), dlatego dąży się do takiego doboru wartości napięć w węzłach sieci, aby moc bierna nie była przesyłana na duże odległości. Optymalizacja profilu napięciowego realizowana jest przez nadrzędne układy regulacji napięcia, które dostarczają wartości zadanych do lokalnych układów regulacji napięcia.

W opracowaniu [Madajewski, Paprocki i Sobczak 2009] przedstawiono optymalizację profilu napięciowego dla KSE (Krajowy System Elektroenergetyczny) przy zwiększonym poziomie generacji wiatrowej w stosunku do aktualnej sumarycznej mocy zainstalowanej w KSE i jego wpływu na bezpieczeństwo systemu. Tamże sugeruje się zastosowanie metody minimalizacji strat realizowanej przez optymalny rozptyw mocy czynnych i biernych (ang. *Optimal Power Flow*) w stacjach normalnych i wyłączach przy uwzględnieniu zapasu stabilności napięciowej.

Zadania układów regulacji napięcia w stacjach nieustalonych formułuje się następująco według [Machowski 2007]:

- zmniejszenie zapadów napięcia;
- ograniczenie przepięć po nagłym zrzuceniu obciążenia lub wyłączeniu zwarcia;
- tłumienie kołysań wirników generatorów synchronicznych i towarzyszących im wahań mocy oraz oscylacji napięć po wystąpieniu zwarcia w sieci WN łączących elektrownie;
- przeciwdziałanie powstawaniu lub rozwojowi zjawiska lawiny napięcia (definicja tego zjawiska w punkcie 3).

Ograniczenie przepięć i zapadów napięcia możliwe jest jedynie przez niektóre bardzo szybkie, bezstopniowe układy regulacji, np. urządzenia FACTS. Nie używa się do tego klasycznych przełączników zaczeów ze względu na skokowy tryb regulacji oraz wymagany przedział czasu pomiędzy przełączeniami. Tłumienie kołysań wirników synchronicznych realizują stabilizatory systemowe.

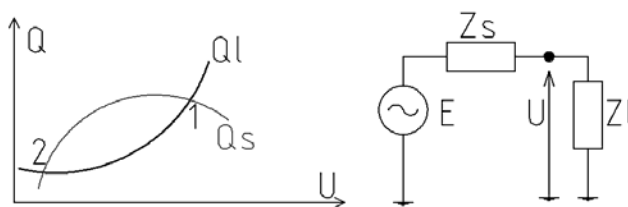
W artykule przedstawiono wpływ regulatorów podobciążeniowych przełączników zaczeów pracujących w stacjach WN/SN na zjawisko lawiny napięcia. Regulatory takie mogą pracować w następujących trybach [Machowski 2007]: regulacja napięcia po dolnej stronie transformatora z kompensacją prądową (najczęściej wykorzystywany);

- praca na zadany zacze;
- regulacja napięcia według regulatora prowadzącego;
- regulacja napięcia z minimalizacją prądów wyrównawczych;
- regulacja mocy biernej przepływającej przez transformator po zadanej jego stronie.

W gdańskim Oddziale Instytutu Energetyki opracowano kryteria regulacji przełączników zacze­pów pracujących w układach przesyłowych (ARNE, ARST, ARNE/ARST) [Powroźnik i Kołodziej 2013]. Zaprezentowano skoordynowane podejście sterowania mocą bierną generatorów oraz transformatorów regulacyjnych, którego celem jest utrzymywanie napięć poszczególnych szyn, wyrównanie obciążenia mocą bierną poszczególnych generatorów z zachowaniem wymaganej rezerwy oraz optymalizacja roz­pływu mocy przy zachowaniu stabilności systemu.

3. STATYCZNA STABILNOŚĆ NAPIĘCIOWA WĘZŁA SIECI

Jedną z cech węzła sieci jest jego stabilność napięciowa. Oznacza ona zdolność systemu elektroenergetycznego do utrzymania napięcia w dopuszczalnych granicach tak, że przy zmniejszaniu impedancji obciążenia moc wydzielana na tym obciążeniu także wzrasta wskutek tego, że zarówno moc, jak i napięcie są kontrolowane [Begovic i in. 1995]. Warunek statycznej stabilności napięciowej węzła w punkcie równowagi opisano zależnością (2). Aby wyznaczyć punkt pracy węzła sieci, wyznacza się przecięcie charakterystyk mocy biernej wytwarzanej $Q_s(U)$ i mocy biernej pobieranej $Q_l(U)$.



Rys. 1. Model Thevenina oraz charakterystyki mocy biernej węzła sieci elektroenergetycznej

Fig. 1. Thevenin model and the characteristics of reactive power network node power

$$\begin{cases} Q_s(U) = Q_l(U), P_s(U) = P_l(U) \\ \frac{dQ_s}{dU} < \frac{dQ_l}{dU} \Leftrightarrow \frac{d\Delta Q}{dU} < 0, \Delta Q = Q_s - Q_l \end{cases} \quad (2)$$

gdzie:

$Q_s(U)$ – charakterystyka wytwarzania mocy biernej oddawanej przez SEE do badanego węzła odbiorczego,

$P_s(U)$ – charakterystyka wytwarzania mocy czynnej oddawanej przez SEE do badanego węzła odbiorczego,

$Q_l(U)$ – charakterystyka mocy biernej odbioru kompleksowego przyłączonego do badanego węzła,

$P_l(U)$ – charakterystyka mocy czynnej odbioru kompleksowego przyłączonego do badanego węzła.

Charakterystyka wytwarzania zależy od mocy czynnej, ponieważ dopuszczalny zakres mocy biernej generatorów zależy od aktualnie wytwarzanej mocy czynnej. Jest ona zależna także od możliwości przesyłowych. Układ równań (2), zależnie od kształtu charakterystyki odbioru oraz wzajemnego położenia obu charakterystyk, może posiadać dwa (lub więcej), jedno albo brak rozwiązań. Rozwiązania te opisują punkty równowagi. Punkt równowagi jest stabilny napięciowo, jeśli niewielki wzrost napięcia w węźle powoduje nadmiar mocy biernej zapotrzebowanej nad wytwarzaną, co skutkuje obniżeniem napięcia. W przypadku niewielkiego spadku napięcia w badanym węźle wystąpi nadwyżka mocy biernej wytwarzanej nad pobieraną, co spowoduje wzrost tego napięcia. Jeżeli w badanym punkcie równowagi nierówność (2) jest spełniona przy przeciwnym znaku, to spadek napięcia w badanym węźle powoduje, że moc bierna pobierana jest większa od wytwarzanej, co generuje nowy stan z jeszcze mniejszą wartością napięcia.

Jeśli pochodna utrzymuje swój znak, powoduje to utratę stabilności napięciowej – lawinowe załamanie napięcia, zwane lawiną napięcia. Przybliżony przebieg lawiny napięcia wraz z jego odbudową i opisem zjawisk towarzyszących zaprezentowano w [Kremens i Sobierajski 1996]. Zapad napięcia w jednym węźle sieci ma wpływ na obniżenie napięcia w węzłach sąsiednich. Z tych powodów zjawisko to może prowadzić do groźnej, kaskadowej awarii systemowej. O awarii napięciowej, która wystąpiła w KSE, traktuje notatka operatora [Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A 2006].

Relacje pomiędzy charakterystykami wytwarzania i odbioru zaprezentowano w [Machowski 2007]. Punkt stabilny występuje dla przypadku przecięcia się charakterystyk w obszarze wyższych napięć. Wzrost obciążenia pobieranego przez węzeł powoduje zmianę punktu pracy na charakterystyce odbiorczej (wzrost mocy biernej odbioru) oraz zmianę wartości wytwarzanej mocy biernej (wzrost mocy czynnej odbioru). Wskutek tego oba punkty przesuwać się do siebie, tworząc punkt styczny obu charakterystyk. Jest to punkt niestabilny, zwany krytycznym, charakteryzujący się napięciem krytycznym U_k i mocą bierną krytyczną Q_k przy zadanej mocy czynnej krytycznej P_k . Przejście węzła z punktu stabilnego do krytycznego może być spowodowane wzrostem obciążenia lub zmianą konfiguracji sieci (obniżenie charakterystyki wytwarzania).

Cechą charakterystyczną, podobnie jak w analizie stabilności układów automatyki, jest zapas stabilności. Analizę stabilności napięciowej przeprowadza się, wykonując obliczenia rozplływowe z pełnym modelem systemu. Wyznacza się punkty pracy wszystkich węzłów (P, Q) . Uwzględniając charakterystyki napięciowe obciążeń, możliwe jest wyznaczenie zapasów stabilności napięciowej każdego z węzłów [Brusiłowicz i Szafran 2014]. Jeśli badana jest stabilność wybranego węzła sieci, to stosuje się twierdzenie Thevenina w celu zastąpieniu pozostałej części modelu rzeczywistym źródłem napięciowym z szeregową impedancją. Charakterystyka wytwarzania opisana jest zależnością (3), przy założeniu $R_s \approx 0$. Jest ona zbliżona do paraboli.

$$Q_s = \sqrt{\left(\frac{EU}{X_s}\right)^2 - P_l^2(U)} - \frac{U^2}{X_s} \quad (3)$$

gdzie:

U – napięcie na odbiorniku Z_L ,

E – sem źródła Thevenina,

Z_s i Z_L – moduł impedancji systemowej (Thevenina) i obciążenia,

$\underline{Z}_s = R_s + jX_s$, $P_l(U)$ – charakterystyka odbioru kompleksowego.

Moc pobieraną przez obciążenie oraz jego napięcie dla obwodu Thevenina opisuje układ równań (4) według [Brusiłowicz i Szafran 2014; Wiszniewski 2007], przy założeniu $W = Z_s/Z_L$:

$$U = \frac{E}{\sqrt{1 + W^2 + 2W \cos \beta}}; \quad S = \frac{E^2 W}{Z_s(1 + W^2 + 2W \cos \beta)} \quad (4)$$

gdzie:

U – napięcie na odbiorniku,

E – sem źródła Thevenina,

S – moc pozorna,

$W = Z_s/Z_L$ – parametr,

Z_s i Z_L – moduł impedancji systemowej (Thevenina) i obciążenia,

$\beta = \varphi_s - \varphi_L$, φ_s i φ_L – kąt impedancji systemowej i obciążenia.

Utrata stabilności wystąpi w punkcie maksymalnego przesyłu mocy do węzła, tj. dopasowania impedancji źródła do odbiornika, według [Vu Khoi i in. 1999]:

$$\left| \overline{Z_s} \right| = \left| \overline{Z_L} \right| \quad (5)$$

gdzie zapas stabilności wyrażono jako [Brusiłowicz i Szafran 2014]:

$$\Delta W = 1 - W = 1 - \left| \overline{Z_s} \right| / \left| \overline{Z_L} \right| \quad (6)$$

Wyznaczenie zapasu stabilności polega na estymacji parametru W . W trakcie stabilnej pracy systemu impedancja obciążenia jest większa niż systemu ($W \in (0 \div 1)$). Metody estymacji parametru W wykorzystują lokalne pomiary prądów i napięć [Vu Khoi i in. 1999; Brusiłowicz, Rebizant i Szafran 2011; Wiszniewski, Rebizant i Klimek 2010].

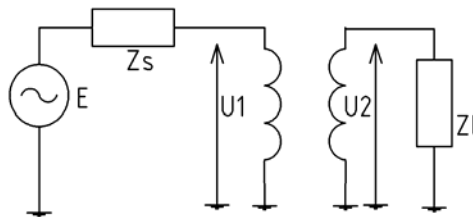
4. ANALIZA WPŁYWU REGULACJI PRZEŁĄCZNIKÓW ZACZEPÓW W STACJI WN/SN NA STABILNOŚĆ NAPIĘCIOWĄ

Analizę wpływu regulacji przełącznika zacze-
pów na stabilność węzła można przeprowadzić na podstawie analizy obwodu, stanowiącego połączenie źródła

Thevenina i odbiornika poprzez transformator o regulowanej przekładni. W przypadku znacznego obniżenia napięcia po stronie pierwotnej obniży się napięcie strony wtórnej. Regulator zwiększy przekładnię (iloraz napięcia wtórnego do pierwotnego) w celu uzyskania prawidłowego zakresu napięć SN. Wzrost przekładni powoduje wzrost poboru mocy czynnej i biernej przez węzeł, tj. wzrost obciążenia od strony WN. To, zależnie od punktu pracy, może spowodować utratę stabilności systemu.

W artykule [Brusiłowicz i Szafran 2014] sprowadzono parametry modelu Thevenina na stronę wtórną i wyznaczono zależność (6):

$$\begin{cases} g = \frac{U_2}{U_1}; U_1 = \frac{E}{\sqrt{1 + (Wg^2)^2 + 2Wg^2 \cos \beta}} \\ U_2 = \frac{Eg}{\sqrt{1 + (Wg^2)^2 + 2Wg^2 \cos \beta}} \end{cases} \quad (6)$$



Rys. 2. Model Thevenina z transformatorem

Fig. 2. Thevenin model and transformer

gdzie:

- U_1 – znormalizowane napięcie pierwotne (WN) transformatora,
- U_2 – znormalizowane napięcie wtórne (SN) transformatora,
- v – znormalizowana przekładnia,
- $W = Z_s/Z_L$, $\beta = \varphi_s - \varphi_L$,
- E – znormalizowana sem.

Zmiana przekładni v powoduje zmianę napięć po obu stronach transformatora. Gdy v rośnie, zwiększa się napięcie wtórne, a maleje pierwotne. Pomiar pochodnych napięć po zmianie przełącznika zaczeptów może być użyty jako kryterium blokowania działania przełącznika. Blokada powinna wystąpić, kiedy zmiana przełącznika nie przynosi zamierzonych efektów.

W [Brusiłowicz i Szafran 2014] przedstawiono jako kryterium nieblokowania regulatora dodatnią sumę pochodnych po przekładni:

$$\frac{dU_2}{dg} + \frac{dU_1}{dg} > 0 \quad (7)$$

Gdy suma pochodnych jest mniejsza od zera, zmiana przekładni powoduje większy spadek napięcia pierwotnego niż przyrost wtórnego. W takim przypadku rozsądne jest blokowanie przełącznika. Z przeprowadzonych symulacji wynika, że suma pochodnych zależna jest od W oraz kąta obciążenia φ_L , jak i charakterystyki odbioru kompleksowego $Z_L = f(U)$. Granica stabilności występuje dla $W = 1$. Uwzględniając przekładnię oraz charakterystykę odbioru na podstawie W , można wyznaczyć przekładnię graniczną. Dla stałej impedancji obciążenia wartość graniczna przekładni wynosi według [Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A 2006]:

$$W = \frac{|Z_S|}{|Z_L|}; \quad W = W_1 \cdot g^2 = 1; \quad g_{lim} = \frac{1}{\sqrt{W_1}} \quad (8)$$

gdzie:

W_1 – współczynnik wyznaczony po uwzględnieniu wpływu przełącznika zacze-
pów,
 v_{lim} – graniczna przekładnia.

5. PODSUMOWANIE

Regulacja przełącznikiem zacze-
pów ma istotny wpływ na stabilność napięciową węzła sieci. Z tego względu praca regulatora przełącznika zacze-
pów powinna uwzględniać stabilność pracy węzła. Algorytm pracy regulatora musi wyliczać zapas stabilności napięciowej węzła.

Stabilność napięciowa w danym węźle zależna jest od zastępczej charakterystyki wytwarzania oraz charakterystyki odbioru kompleksowego. W SEE charakterystyki są zmienne w czasie nawet w tym samym węźle, ponieważ zmienia się stan obciążenia i skład zarówno po stronie wytwarzania, jak i odbiorczej. Uniemożliwia to stworzenie regulatora, który na podstawie tylko wielkości pomiarowych odtworzyłby części tych charakterystyk w celu wyznaczenia stabilności.

Regulator w celu oceny zapasu stabilności napięciowej powinien estymować parametr W na podstawie lokalnych wielkości pomiarowych np. z wykorzystaniem techniki fazorów napięć i prądów PMU (ang. *Phasor Measurement Unit*). Innym aspektem jest wyznaczenie minimalnego zapasu stabilności napięciowej, z jakim powinien pracować układ regulacji napięcia.

Zagrożenie utraty stabilności w węźle następuje przy wyczerpaniu się możliwości regulacyjnych mocy biernej po stronie WN i pracy regulatora transformatora WN/SN w trybie regulacji napięcia dolnego. Wskazane jest zatem zbadanie możliwości adaptacji nowych kryteriów regulacji dla stacji GPZ. W stacjach tych często podłączane są źródła rozproszone. Regulator może przełączać się pomiędzy poszczególnymi trybami pracy w zależności od aktualnego zapasu stabilności i uchybu regulacji.

LITERATURA

- Begovic, M., Fulton, D., Gonzales, M.R., Goossens, J., 1995, *Summary of System Protection and Voltage Stability*, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 10, no. 2.
- Brusiłowicz, B., Rebizant, W., Szafran, J., 2011, *A New Method of Voltage Stability Margin Estimation Based on Local Measurements*, APAP 2011, Conference, Beijing, vol. 1790, s. 2443–2447.
- Brusiłowicz, B., Szafran J., 2014, *Badanie wpływu działania przełącznika zaczepek transformatora na stabilność napięciową*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 3, s. 90–93.
- Kremens, Z., Sobierajski, M., 1996, *Analiza systemów elektroenergetycznych*, WNT, Warszawa.
- Machowski, M.J., 2007, *Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa.
- Madajewski, K., Paprocki R., Sobczak B., 2009, *Voltage Profile Optimization in Polish Power system*, XIV Międzynarodowa Konferencja „Naukowa Aktualne Problemy w Elektroenergetyce”, Jurata, , t. I, s. 53–61.
- Polskie Sieci Elektroenergetyczne S.A., 2006, *Notatka Zarządu PSE-Operator S.A. w sprawie awarii napięciowej w krajowym systemie elektroenergetycznym w dniu 26.06.2006*.
- Powroźnik, M., Kołodziej, D., 2013, *Nowe algorytmy regulacji napięcia i mocy biernej stosowane w układach ARNE/ARST dla autotransformatorów pracujących w przyelektrownianych stacjach elektroenergetycznych najwyższych napięć – część 1*, „Przegląd Elektrotechniczny”, nr 11, s. 125–128.
- Vu Khoi, Begovic, M., Novosel, D., Saha, M.M., 1999, *Use of Local Measurements to Estimate Voltage Stability Margin*, IEEE Transactions Power Syst., vol. 14, no. 3.
- Wiszniewski, A., 2007, *New Criteria of Voltage Stability Margin for the Purpose of Load Shedding*, IEEE Transactions Power Delivery, vol. 22, no. 3, s. 1367–1371.
- Wiszniewski, A., Rebizant, W., Klimek, A., 2010, *Intelligent Voltage Difference Control Maintaining the Voltage Stability Limit*, Proceedings of the 43th CIGRE Session, Paris, France.