

Wpływ regulacji przekładni transformatora blokowego na dopuszczalny obszar pracy zespołu wytwórczego

Abstract. The synchronous generator is a source of real and reactive power, which can be conveniently regulated over a wide range of values. The real and reactive power control of the synchronous generator are limited by the reactive power capability curve, which is determined by the following constraints: the stator (armature) current, the rotor (field) current, the power angle (due to the steady-state stability), the temperature in the end region of the stator magnetic circuit, the turbine power, terminal voltage of the generator. The large generating unit operate on the high voltage network by the step-up transformers, which can be equipped with the on-load tap changers. This paper discusses how the control of the transformation ratio of the step-up transformers can change the area surrounded by the reactive power capability curve. Equations suitable for such analysis are derived and a numerical example is presented. **Influence of the on-load control of the tap changing step-up transformer on the reactive power capability curve of the generating unit**

Streszczenie. Generatory synchroniczne są wygodnymi regulowanymi źródłami mocy czynnej i biernej. Dopuszczalny obszar pracy bloku generator-transformator jest ograniczony krzywą określoną przez następujące ograniczenia: prąd uzwojenia stojana, prąd uzwojenia wirnika (wzbudzenia), kąt obciążenia (stabilność lokalna), temperatura skrajnych elementów stojana, moc turbiny, napięcie na zaciskach generatora. Duże generatory pracują na sieć wysokiego napięcia poprzez transformatory blokowe, które mogą być wyposażone w regulację przekładni pod obciążeniem. W artykule omawia się jak regulacja przekładni może wpływać na dopuszczalny obszar pracy bloku generator-transformator. Wprowadzono wzory odpowiednie do takiej analizy oraz podano przykład liczbowy.

Key words: power system, reactive power capability curve, on-load tap changing transformers

Słowa kluczowe: system elektroenergetyczny, dopuszczalny obszar pracy generatora, transformatory regulacyjne

Wstęp

W systemie elektroenergetycznym generatory synchroniczne dostarczają ponad 60% mocy biernej i są jej głównymi źródłami. Zaletą tych źródeł jest płynna regulacja w szerokim zakresie mocy czynnej (regulacja napędu) i mocy biernej (regulacja wzbudzenia generatora) [1,2]. W regulacji mocy biernej zespołu wytwórczego (blok generator-transformator) może uczestniczyć także regulacja przekładni transformatora blokowego pod obciążeniem.

W Polsce w latach ubiegłych nie stosowano regulacji przekładni transformatorów blokowych pod obciążeniem. Aktualne zapisy zawarte w [5,6] dotyczące zespołów wytwórczych o wielkich mocach (np. 900 MW) nakładają wymóg zapewnienia szerokiego zakresu regulacyjnego zarówno co do mocy czynnej jak i biernej. Potrzeba zwiększenia zakresów regulacyjnych zarówno mocy czynnej jak i biernej wynika z faktu dużych dobowych zamian zapotrzebowania oraz rosnącego udziału w wytwarzaniu źródeł niespokojnych (farmy wiatrowe) o zmiennej mocy. Oczekuje się, że w dolinach obciążeń lub wzrostu generacji źródeł niespokojnych duże regulacyjne zespoły wytwórcze będą mogły pracować w szerokim zakresie zmian mocy biernej kosztem obniżenia mocy czynnej.

W dokumencie [4] zastosowanie regulacji przekładni transformatora blokowego uzależnia się od roli zespołu wytwórczego w systemie elektroenergetycznym i faktu, czy wytwórca chce oferować operatorowi systemu swoją zdolność regulacyjną w szerokim zakresie.

Charakterystykę napięciową bloku wytwórczego z uwzględnieniem działania regulatora generatora omówiono

w [7]. W prezentowanym artykule omawia się wpływ regulacji przekładni transformatora blokowego na obszar dopuszczalnej pracy zespołu wytwórczego.

Współpraca regulatora węzła z regulatorami generatora i transformatora blokowego

Zakłada się, że regulacja bloku wytwórczego obejmuje generator i transformator blokowy. Regulacja dotyczy dwóch obiektów różniących się pod względem szybkości oraz charakteru regulacji. Regulacja generatora ma charakter ciągły i jest regulacją szybką. Regulacja transformatora ma charakter dyskretny, a proces regulacji jest znacznie wolniejszy od procesu regulacji generatora.

W celu prawidłowego przebiegu regulacji regulatory tych dwóch różnych urządzeń nie powinny działać według tego samego kryterium. W pracach [8,9,10] wykazano, że dla prawidłowego przebiegu regulacji regulator transformatora powinien utrzymywać zadaną wartość napięcia po dolnej stronie transformatora (czyli na zaciskach generatora), zaś regulator generatora powinien utrzymywać zadaną wartość napięcia po stronie WN zespołu wytwórczego z uwzględnieniem zachowania małego statyzmu charakterystyki napięciowej [1,2].

Przy takim podziale ról zespół wytwórczy "widziany" jest od strony systemu jako źródło napięcia za małą reaktancją odpowiadającą zastosowanej reaktancji kompensacji prądowej. Przy pracy w zakresie regulacyjnym zmiany pobieranej mocy biernej nie wywołują znacznych zmian napięcia na szynach WN. Regulacja przekładni transformatora powinna odbywać się jako regulacja napięcia wg następującej reguły:

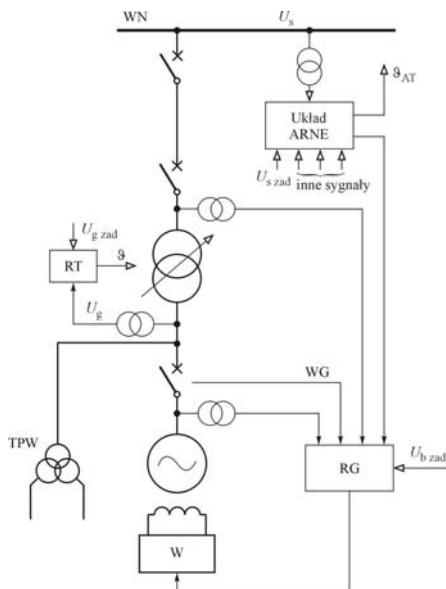
$$(1a) \quad \begin{cases} U_g > (U_{nG} + \Delta U) & \text{zwiększ } \vartheta \\ U_g < (U_{nG} - \Delta U) & \text{zmniejsz } \vartheta \end{cases}$$

gdzie U_g jest dolnym napięciem transformatora po stronie generatora, U_{nG} jest napięciem znamionowym generatora, ϑ jest przekładnią transformatora definiowaną jako napięcie górne do dolnego, ΔU jest martwą strefą regulatora dobraną wg wzoru

$$(1b) \quad \Delta U = (0,6 \div 0,7) \cdot \Delta U_z$$

w którym ΔU_z jest napięciem przypadającym na zaczepek regulacyjny transformatora. Wg [2] taki dobór martwej strefy gwarantuje stabilną regulację, gdyż łączna szerokość martwej strefy $\pm \Delta U$ jest większa od napięcia zaczepowego, czyli $2\Delta U \geq (1,2 \div 1,4)\Delta U_z$.

Opóźnienie czasowe można, jak zaproponowano w artykule [14], uzależnić od położenia aktualnego punktu pracy względem granicy obszaru dopuszczalnych obciążeń zespołu wytwórczego. W pobliżu granicy tego obszaru regulacja przekładni może być wykonywana z mniejszymi opóźnieniami zaś wewnątrz obszaru regulacyjnego generatora liczba przełączeń może być znacząco ograniczona. Prostszy rozwiązaniem jest uzależnienie opóźnienia czasowego od uchybu regulowanego napięcia [2].



Rys. 1. Regulatory bloku generator - transformator

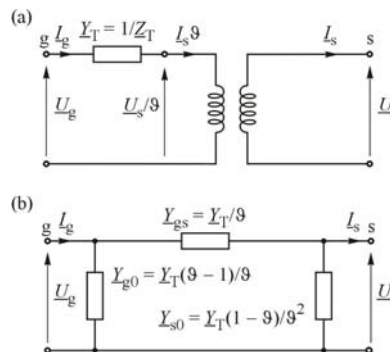
W systemie regulacji węzła wytwórczego można założyć, że regulację przekładni transformatora blokowego wykonuje system nadrzędny ARNE (automatyczna regulacja napięcia elektrowni). Można też założyć, że regulację przekładni transformatorów blokowych wykonują typowe regulatory przekładni [2] pracujące autonomicznie bez powiązań z systemem nadrzędnym ARNE. Ilustruje to Rys 1.

Wpływ regulacji przekładni transformatora blokowego na charakterystykę $Q(P)$

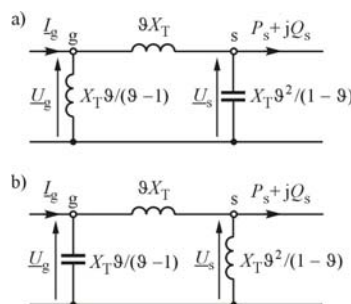
Analiza wpływu przekładni transformatora blokowego została wykonana w oparciu o schemat zastępczy transformatora pokazany na Rys. 2. Idealny transformator o przekładni ϑ znajduje się (Rys. 2a) po stronie wysokiego napięcia.

Korzystając z metody potencjałów węzłowych można wykazać [1,2], że transformator o impedancji Z_T oraz przekładni ϑ może być zastąpiony czwórnikiem π w którym admitancje gałęzi wzdłużnej i poprzecznych zależą od

przekładni (Rys. 2b). Taki schemat zastępczy nazywany jest schematem rezonansowym, gdyż występujące w nim gałęzie poprzeczne wraz z reaktancją transformatora tworzą obwody podwyższające lub obniżające napięcie. Uwzględniając, że $Y_T = 1/Z_T$ dla $Z_T = jX_T$ oraz $\vartheta > 1$ po górnej stronie transformatora (strona sieci) w gałęzi poprzecznej w węzle s otrzymuje się (Rys. 3a) pojemność zastępczą, zaś indukcyjność w węzle g po dolnej stronie transformatora (strona generatora). Dla $\vartheta < 1$ po górnej stronie w węzle s w gałęzi poprzecznej otrzymuje się indukcyjność zastępczą, zaś pojemność w węzle g, po stronie dolnej (Rys. 3b).



Rys. 2. Schematy zastępcze transformatora dwuuzwojeniowego



Rys. 3. Schematy rezonansowe transformatora (a) dla $\vartheta > 1$ (b) dla $\vartheta < 1$

Ze schematu rezonansowego (Rys. 3) wynika, że zmiana przekładni transformatora blokowego ma istotny wpływ na rozdział mocy biernej.

1.1 Schematy zastępcze bloku

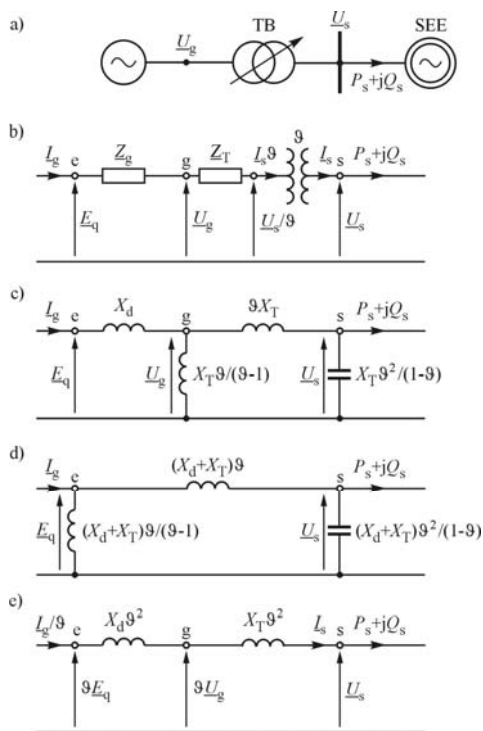
Rozważa się blok generator-transformator (Rys. 4a) w którym transformator ma przekładnię regulowaną pod obciążeniem. Dalsze rozważania przeprowadza się w jednostkach względnych (napięcie po stronie górnej odniesione jest do napięcia znamionowego sieci, a po stronie dolnej do napięcia znamionowego generatora). Przekładnię transformatora blokowego ϑ definiuje się (Rys. 4b) jako stosunek napięcia górnego do dolnego.

Do dalszych rozważań zakłada się, że generator jest zastąpiony synchroniczną siłą elektromotoryczną E_q za reaktancją synchroniczną, czyli $Y_g = 1/Z_g = 1/jX_d$, zaś transformator reaktancją wzdłużną, czyli $Y_T = 1/jX_T$.

Analogicznie jak na Rys. 3 pomija się rezystancję i w schemacie zastępczym bloku pokazanym Rys. 4c uwzględnia się tylko elementy reaktancyjne.

Korzystając ze znanych wzorów [1,3] przekształcania gwiazdy impedancji w trójkąt impedancji, schemat z Rys. 4c można przekształcić do schematu z Rys. 4d. Warto zauważyć, że w uzyskanym czwórniku zastępczym bloku wszystkie gałęzie zależą od sumy reaktancji ($X_d + X_T$), a

suma ta jest przemnażana przez współczynniki zależne od przekładni w sposób identyczny jak w czwórniku zastępującym transformator (Rys. 3 oraz Rys. 4c).



Rys. 4. Schematy zastępcze bloku generator- transformator

Schemat pokazany na Rys. 4e uzyskuje się ze schematu wyjściowego (Rys. 4b) sprowadzając napięcia oraz impedancje na górną stronę transformatora tj. na stronę sieci.

Wszystkie schematy pokazane na Rys. 4 są równoważne i mogą być wykorzystywane zależnie od tego jakie wielkości są obliczane i jakich relacji między nimi się poszukuje.

1.2 Moc czynna i bierna

Dla czwórnika o reaktancji X oraz napięciach $\underline{E}, \underline{U}$ (odpowiednio na początku i końcu) można wykazać [1,2], że moce wyjściowe dane są następującymi wzorami:

$$(2) \quad P = \frac{EU}{X} \sin \theta; \quad Q = \frac{EU}{X} \cos \theta - \frac{U^2}{X}$$

gdzie $\theta = \arg(\underline{E}\underline{U})$ jest różnicą argumentów obu napięć.

Wzory (7) zostaną teraz zastosowane do schematu z Rys. 2d. Przyjmuje się, że argumenty napięć liczone są względem napięcia sieci: $\underline{U}_s = U_s \angle 0$; $\underline{E}_q = E_q \angle \delta$, czyli różnica argumentów obu napięć w rozważanym układzie wynosi δ .

Wzory (2) można zastosować do schematu z Rys. 4e lub schematu z Rys. 4d, przy czym dla Rys. 4d obliczając moc bierną należy uwzględnić moc gałęzi poprzecznej. W oby przypadkach uzyskuje się:

$$(3a) \quad P_s = \frac{E_q U_s}{9(X_d + X_T)} \sin \delta$$

$$(3b) \quad Q_s = \frac{E_q U_s}{9(X_d + X_T)} \cos \delta - \frac{U_s^2}{9^2(X_d + X_T)}$$

Obie moce są nieliniowymi funkcjami kąta δ . Kąt ten nazywany jest kątem obciążenia. Moc czynna jest

odwrotnie proporcjonalna do przekładni, zaś w mocy biernej jeden składnik jest odwrotnie proporcjonalny do przekładni a drugi odwrotnie proporcjonalny do kwadratu przekładni. Przy zadanych wartościach napięć zmiany przekładni wywołują zmiany mocy czynnej i biernej.

1.3 Dopuszczalny obszar pracy $Q(P)$

Dopuszczalny obszar pracy bloku wytwórczego z uwzględnieniem regulacji przekładni transformatora blokowego wynika z opisu matematycznego schematu zastępczego z Rys. 4 oraz ograniczeń konstrukcyjnych urządzeń. Analiza tych ograniczeń (warunków) pozwala określić dopuszczalny obszar pracy zespołu wytwórczego.

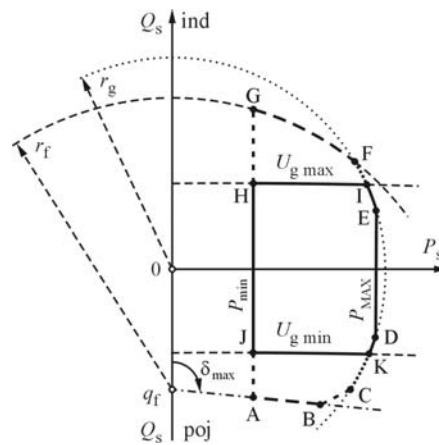
Warunek W1 zakłada, że prąd stojana nie może być większy od zadanej wartości dopuszczalnej. Na płaszczyźnie (P, Q) warunek ten odpowiada okręgowi, którego promień i położenie środka wynikają z następującego rozumowania.

Moce czynna i bierna w jednostkach względnych dane są wzorami: $P_s = U_s I_s \cos \varphi$ oraz $Q_s = U_s I_s \sin \varphi$. Po uwzględnieniu, że $I_s = I_g / 9$ oraz podniesieniu tych wzorów obustronnie do kwadratu i zsumowaniu, otrzymuje się zależność $P_s^2 + Q_s^2 = (U_s I_g / 9)^2$, gdyż

$\sin^2 \varphi + \cos^2 \varphi = 1$. Na płaszczyźnie (P, Q) powyższe równanie odpowiada okręgowi o promieniu $U_s I_g / 9$ oraz środka w początku układu współrzędnych. Przy danym napięciu sieci U_s oraz obciążeniu generatora maksymalnym prądem $I_g = I_{g \max}$ uzyskuje się równanie

$$(4) \quad P_s^2 + Q_s^2 = (U_s I_{g \max} / 9)^2$$

odpowiadające okręgowi o promieniu $r_g = U_s I_{g \max} / 9$.



Rys. 5. Dopuszczalny obszar pracy bloku generator-transformator przy danym napięciu

Na Rys. 5 fragment tego okręgu wykreślono linią kropkową. Punkty odpowiadające mocom, dla których spełniony jest warunek $I_g < I_{g \max}$ leżą wewnątrz tego okręgu. Promień okręgu zależy odwrotnie proporcjonalnie od przekładni 9 tzn. gdy regulator transformatora blokowego zwiększa przekładnię, to promień okręgu maleje i odwrotnie, gdy regulator transformatora blokowego zmniejsza przekładnię, to promień okręgu zwiększa się. Wartość maksymalnego prądu obciążenia generatora należy przyjąć zgodnie z zaleceniami producenta np. $I_{g \max} = I_{nG}$ lub $I_{g \max} = 1,05 I_{nG}$, gdzie I_{nG} jest prądem znamionowym.

Warunek W2 zakłada, że prąd wirnika nie może być większy od zadanej wartości dopuszczalnej. Na płaszczyźnie (P, Q) warunek ten odpowiada okręgowi, którego promień i położenie środka wynikają z następującego rozumowania. Wzory (3a,b) można zapisać następująco:

$$(5a) \quad \frac{E_q U_s}{g(X_d + X_T)} \sin \delta = P_s$$

$$(5b) \quad \frac{E_q U_s}{g(X_d + X_T)} \cos \delta = Q_s + \frac{U_s^2}{g^2(X_d + X_T)}$$

Po obustronnym podniesieniu do kwadratu i zsumowaniu otrzymuje się następujące równanie:

$$(6) \quad P_s^2 + \left[Q_s + \frac{U_s^2}{g^2(X_d + X_T)} \right]^2 = \left[\frac{E_q U_s}{g(X_d + X_T)} \right]^2$$

Dla wartości $E_q = E_{q \max}$ równanie to przyjmuje postać

$$(7) \quad P_s^2 + \left[Q_s + \frac{U_s^2}{g^2(X_d + X_T)} \right]^2 = \left[\frac{E_{q \max} U_s}{g(X_d + X_T)} \right]^2$$

która odpowiada okręgowi o promieniu i przesunięciu środka określonych następującymi wzorami:

$$(8) \quad r_f = \frac{E_{q \max} U_s}{g(X_d + X_T)} ; \quad q_f = -\frac{U_s^2}{g^2(X_d + X_T)}$$

Stąd wynika, że przesunięcie środka okręgu jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu przekładni, zaś promień odwrotnie proporcjonalny do przekładni. Okrąg ten przecina oś pionową (moc bierna dla zerowej mocy czynnej) w punkcie:

$$(9) \quad r_f + q_f = \frac{U_s}{g(X_d + X_T)} \left(E_{q \max} - \frac{U_s}{g} \right)$$

Siła elektromotoryczna synchroniczna generatora jest około dwukrotnie większa od napięcia znamionowego i można przyjąć $E_{q \max} \gg U_s$. W takim przypadku z wzoru

(9) wynika, że przy zwiększaniu przekładni g łuk FG na Rys. 5 obniża się, czyli "regulacja w górę" powoduje obniżenie ograniczenia mocy biernej wynikającego z prądu wzbudzenia generatora.

Synchroniczna sem E_q występująca w powyższych równaniach zależy od prądu wzbudzenia. Tym samym jej maksymalna wartość $E_{q \max}$ zależy od dopuszczalnej wartości prądu wzbudzenia tj. długotrwałej dopuszczalnej obciążalności uzwojenia wzbudzenia. Producenci na ogół nie dopuszczają wartości prądów wzbudzenia wyższych od znamionowych niezależnie od wartości napięcia generatora. Przy założeniu, że uzwojenia wirnika generatora nie są przeciążane, czyli prąd dopuszczalny odpowiada prądowi znamionowemu $I_{f \max} = I_{nf}$ oraz $E_{q \max} = E_{nq}$, znamionową wartość sem E_{nq} można obliczyć jako krotność napięcia znamionowego generatora przy współczynniku krotności zależnym od reaktancji synchronicznej oraz współczynnika mocy. Wynika to z następującego rozumowania. Dla schematu zastępczego generatora (lewa strona Rys. 4b) można napisać następujące wzory analogiczne do wzorów (2):

$$(10) \quad P_g = \frac{E_q U_g}{X_d} \sin \delta_{ge}; \quad Q_g + \frac{U_g^2}{X_d} = \frac{E_q U_g}{X_d} \cos \delta_{ge}$$

gdzie δ_{ge} jest różnicą argumentów sem oraz napięcia generatora. Podnosząc te równania stronami do kwadratu i po ich zsumowaniu stronami otrzymuje się:

$$(11) \quad P_g^2 + \left[Q_g + \frac{U_g^2}{X_d} \right]^2 = \left[\frac{E_q U_g}{X_d} \right]^2$$

$$(12) \quad E_q^2 = U_g^2 \left[\left(1 + X_d \frac{Q_g}{U_g^2} \right)^2 + \left(X_d \frac{P_g}{U_g^2} \right)^2 \right]$$

Równanie (12) jest słuszne dla każdego stanu obciążenia i w szczególności dla mocy znamionowych, $P_{nG} = S_{nG} \cos \varphi_{nG}$, $Q_{nG} = S_{nG} \sin \varphi_{nG}$ oraz napięcia znamionowego U_{nG} , gdzie $\cos \varphi_{nG}$ jest znamionowym współczynnikiem mocy. Wiadomo też, że reaktancja synchroniczna $X_d = X_{d \text{ jw}} U_{nG}^2 / S_{nG}$, gdzie $X_{d \text{ jw}}$ jest reaktancją w jednostkach względnych. Po podstawieniu tych zależności do równania (12) otrzymuje się:

$$(13) \quad E_{nq}^2 = U_{nG}^2 \left[\left(1 + X_{d \text{ jw}} \sin \varphi_{nG} \right)^2 + \left(X_{d \text{ jw}} \cos \varphi_{nG} \right)^2 \right]$$

Stąd po prostych przekształceniach otrzymuje się następujący wzór na synchroniczną sem generatora przy obciążeniu znamionowym:

$$(14) \quad E_{nq} = k_{nf} U_{nG};$$

$$k_{nf} = \sqrt{1 + X_{d \text{ jw}} (X_{d \text{ jw}} + 2 \cdot \sin \varphi_{nG})}$$

Oznacza to, że znamionowa sem generatora jest krotnością napięcia znamionowego.

Warunek W3 dotyczy ograniczenia kąta mocy. Na płaszczyźnie (P, Q) warunek ten odpowiada linii prostej, której położenie i nachylenie wynikają z następującego rozumowania. Dzieląc równania (5) stronami otrzymuje się:

$$(15) \quad P_s = \left(Q_s + \frac{U_s^2}{g^2(X_d + X_T)} \right) \cdot \text{tg} \delta$$

Stąd po podstawieniu $\delta = \delta_{\max}$ uzyskuje się równanie

$$(16a) \quad P_s = m Q_s + c$$

$$(16b) \quad m = \text{tg} \delta_{\max}; \quad c = \frac{U_s^2}{g^2(X_d + X_T)} \text{tg} \delta_{\max}$$

Na płaszczyźnie (P, Q) równanie (16a) wyznacza prostą przecinającą oś mocy biernej Q pod kątem δ_{\max} w punkcie

$Q_s = -c/m = -U_s^2 / [g^2(X_T + X_d)] = q_f$, tj. przez środek okręgu o promieniu i przesunięciu środka określonych wzorami (8). Na Rys. 5 prosta odpowiadająca równaniu (16a) jest wykreślona linią kropkowo-kreskową.

Zgodnie z wzorami (8) przesunięcie środka okręgu i tym samym prostej (16a) jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu przekładni. Można więc powiedzieć, że przy zmniejszaniu przekładni prosta (16a) obniża się i tym samym ograniczenie mocy biernej (odcinek A-B na Rys. 5) obniża się, czyli zakres pracy pojemnościowej jest większy.

Warunek W4 dotyczący ograniczenia temperatury w skrajnych elementach obwodu magnetycznego stojana nie da się ująć w proste zależności matematyczne. Odpowiednia krzywa musi być określona przez producenta generatora. Ograniczenie to pojawia się w obszarze dużych obciążeń czynno - pojemnościowych. Na Rys. 5 jest to krzywa B-C.

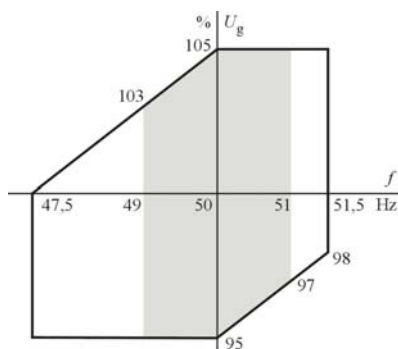
Warunek W5 dotyczący mocy turbiny uzależniony jest od rodzaju turbiny i jej dostosowania do pracy w szerokim zakresie zmian mocy czynnej. Na Rys. 5 odpowiednie ograniczenia zaznaczono za pomocą prostych pionowych odpowiadających P_{\max} oraz P_{\min} .

Na Rys. 5 obszar wewnątrz którego nie ma przekroczenia żadnego z wymienionych ograniczeń zaznaczono linią ciągłą pogrubioną. Jest to obszar ABCDEFG ograniczony omówionymi wyżej odcinkami i łukami. Jak wykazano, zmiany przekładni transformatora blokowego wpływają na położenie prostej AB oraz łuków CD, EF, FG.

Należy zauważyć, że wszystkie trzy omówione ograniczenia elektryczne W1, W2, W3 zależą od wartości napięcia U_s na szynach do których przyłączony jest blok wytwórczy. Wartość tego napięcia wpływa na promień r_g okręgu (4) oraz na promień r_f i przesunięcie q_f okręgu (7) a także na przesunięcie q_f prostej (16a). Im większa wartość napięcia U_s tym szerszy obszar ABCDEFG. Z tego względu charakterystykę $Q(P)$ pokazaną na Rys. 5 wyznacza się zawsze dla zadanej wartości napięcia U_s .

1.4 Charakterystyka $Q(P)$ przy zadanym $U_g = \text{const}$

Dla współczesnych generatorów dopuszczalne zmiany napięcia i częstotliwości są dość małe [15]. Rys. 6 ilustruje zakres rekomendowany przez normę [16]. Dla częstotliwości znamionowej dopuszczalny zakres zmian napięcia generatora jest $\pm 5\%$ w stosunku do napięcia znamionowego.



Rys. 6. Dopuszczalne zmiany napięcia i częstotliwości wg [16]

Biorąc to pod uwagę, do powyższych warunków ograniczających dopuszczalny obszar pracy bloku wytwórczego należy dopisać jeszcze następujący dodatkowy warunek.

Warunek W6 dotyczy ograniczenia wartości napięcia generatora do przedziału:

$$(17) \quad U_{g \max} \leq U_g \leq U_{g \min}$$

Wzór na charakterystykę $Q(P)$ przy zadanym U_g najprościej można wyprowadzić korzystając ze schematu pokazanego na Rys. 4a, a ściślej części tego schematu dotyczącej transformatora blokowego. Analogicznie do równań (3) dla prawej strony schematu z Rys. 4a można napisać:

$$(18) \quad P_s = \frac{U_g U_s}{X_T g} \sin \delta_T; \quad Q_s + \frac{U_s^2}{g^2 X_T} = \frac{U_g U_s}{X_T g} \cos \delta_T$$

gdzie δ_T jest różnicą argumentów napięć na impedancji transformatora. Podnosząc do kwadratu stronami równania (18), po zsumowaniu otrzymuje się równanie:

$$(19) \quad P_s^2 + \left(Q_s + \frac{U_s^2}{g^2 X_T} \right)^2 = \left(\frac{U_s U_g}{g X_T} \right)^2$$

odpowiadające okręgowi o promieniu i przesunięciu środka, określonych następującymi wzorami:

$$(20) \quad r_T = \frac{U_g U_s}{g X_T}; \quad q_T = - \frac{U_s^2}{g^2 X_T}$$

Rozwiązując równanie (19) względem mocy biernej otrzymuje się następujący wzór

$$(21) \quad Q_s = \sqrt{\left(\frac{U_s U_g}{g X_T} \right)^2 - P_s^2} - \frac{U_s^2}{g^2 X_T}$$

określający zmiany mocy biernej przy zadanych wartościach mocy czynnej i napięcia.

Charakterystyki $Q(P)$ dane wzorem (21) są łukami okręgu określonego równaniem (19). Ponieważ $X_T \ll X_d$, zarówno przesunięcie jak i promień tego okręgu są wielokrotnie większe od przesunięcia i promienia okręgu określonego równaniem (7), czyli zachodzi: $r_T \gg r_f$ oraz $|q_T| \gg |q_f|$. Z tego względu łuki odpowiadające okręgom (19) pokazane na Rys. 5 mogą być aproksymowane za pomocą odcinków.

Jeśli transformator blokowy ma stałą przekładnię $g = g_0 = \text{const}$ to przy danej wartości napięcia sieci ograniczenia $U_{g \max}$, $U_{g \min}$ wynikające z warunku (17) mogą leżeć wewnątrz obszaru ABCDEFG (Rys. 5). W takim przypadku dopuszczalny obszar pracy bloku jest ograniczony jedynie do obszar HIEDKJ.

Jak wykazano zatem, decydującym ograniczeniem w generacji mocy biernej może być ograniczenie napięcia generatora, a nie ograniczenie prądu wzbudzenia.

Położenie wyżej opisanych łuków $U_{g \max}$ oraz $U_{g \min}$ zależy od napięcia sieci U_s i nie jest stałe. Na szczęście wpływ zmian napięcia sieci jest korzystny i zgodny z potrzebami systemu elektroenergetycznego.

Łuki przecinają oś pionową (moc bierna przy zerowej mocy czynnej) w przy wartościach:

$$(22a) \quad Q(U_{g \max}) = r_T + q_T = \frac{U_s}{g X_T} \left(U_{g \max} - \frac{U_s}{g} \right)$$

$$(22b) \quad Q(U_{g \min}) = r_T + q_T = \frac{U_s}{g X_T} \left(U_{g \min} - \frac{U_s}{g} \right)$$

Przy pracy indukcyjnej różnica napięć po prawej stronie wzoru (22a) jest dodatnia i zwiększa się, gdy wskutek deficytu mocy biernej w systemie napięcie sieci U_s obniża się. To powoduje, że łuk $U_{g \max}$ ograniczający moc bierną podnosi się umożliwiając oddawanie coraz większej mocy biernej. Zwiększanie przekładni g ma podobny wpływ tj. powoduje podnoszenie łuku $U_{g \max}$.

Przy pracy pojemnościowej różnica napięć po prawej stronie wzoru (22b) jest ujemna, a jej wartość bezwzględna zwiększa się, gdy wskutek nadmiaru mocy biernej w systemie napięcie sieci U_s podnosi się. To powoduje, że łuk $U_{g \min}$ ograniczający moc bierną obniża się umożliwiając pobieranie coraz większej mocy biernej. Zmniejszanie przekładni g ma podobny wpływ tj. powoduje obniżanie łuku $U_{g \min}$.

1.5 Wpływ zmian przekładni - podsumowanie

Wpływ zmian przekładni na ograniczenia obszaru dopuszczalnej pracy bloku generator-transformator jest odmienny w górnej (indukcyjnej) części obszaru oraz w jego części dolnej (pojemnościowej).

Z wzorów (8)(9) oraz (22a) wynika, że w górnej (indukcyjnej) części obszaru zwiększenie przekładni ϑ zawęża obszar, obniżając nieco łuk FG wynikający z ograniczenia prądu wzbudzenia ale podnosi łuk U_{gmax} wynikający z ograniczenia napięcia generatora (Rys. 5). W rezultacie, w tym obszarze zwiększanie przekładni może być korzystne.

Z wzorów (8)(9) oraz (22b) wynika, że w dolnej (pojemnościowej) części obszaru zmniejszenie przekładni ϑ obniża prostą AB wynikającą z ograniczenia kąta obciążenia oraz obniża łuk U_{gmin} wynikający z ograniczenia napięcia generatora (Rys. 5). W rezultacie w tym obszarze zmniejszenie przekładni jest zawsze korzystne dla poszerzenia obszaru dopuszczalnej pracy bloku.

Wewnątrz obszaru regulacyjnego oba regulatory (regulator generatora i regulator transformatora) współdziałają ze sobą w następujący sposób.

W obszarze górnym (indukcyjnym), gdy z powodu niedoboru mocy biernej w systemie napięcie sieci obniża się, regulator generatora zwiększa wzbudzenie, co powoduje wzrost napięcia generatora i zgodnie z regułą (1a) regulator transformatora zwiększa przekładnię, co wprawdzie powoduje zwężenie obszaru od strony ograniczenia wynikającego od prądu wzbudzenia (łuk GF na Rys. 5), ale podnosi łuk U_{gmax} , co powoduje powiększenie faktycznego dopuszczalnego obszaru pracy bloku.

W obszarze dolnym (pojemnościowym) gdy z powodu nadmiaru mocy biernej w systemie napięcie sieci zwiększa się, regulator generatora zmniejsza wzbudzenie, co powoduje zmniejszenie napięcia generatora i zgodnie z regułą (1a) regulator transformatora zmniejsza przekładnię, co powoduje poszerzenie obszaru od strony ograniczenia wynikającego od kąta mocy (prosta AB na Rys. 5) oraz obniża łuk U_{gmin} , co powoduje powiększenie faktycznego dopuszczalnego obszaru pracy bloku.

Przykład

Zespół wytwórczy pracuje na sieć 400 kV i ma następujące dane: $S_{nG} = 1042$ MVA; $U_{nG} = 27$ kV; $X_d = 223\%$; $\cos\varphi_{nG} = 0,85$; zakres napięcia $U_g = U_{nG} \pm 5\%$; maksymalny prąd stojana $I_{gmax} = 1,05 I_{nG}$; $S_{nT} = 1050$ MVA; $X_T = 17,714\%$, $U_{nT\ dolne} = 27$ kV; $U_{nT\ gorne} = 407$ kV $\pm 7 \times 1,25\%$.

Dla porównania analizę wykonano także dla wariantu przy założeniu zainstalowania transformatora blokowego o stałej przekładni i napięciu $U_{nT\ gorne} = 420$ kV.

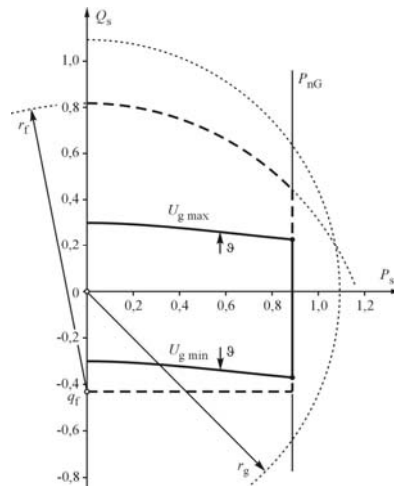
Przyjęto następujące jednostki bazowe wspólne dla całego układu: $[S] = 1000$ MVA; $[U_s] = 400$ kV; $[U_g] = 27$ kV. Po przeliczeniu danych znamionowych do jednostek względnych otrzymuje się: $S_{nG} = 1,042$; $U_{nG} = 1$; $S_{nT} = 1,050$; $U_{nTg} = 1$ oraz $U_{nTs} = 1,0175$. Reaktancje przeliczono do wspólnej jednostki wg wzoru: $X_{jw} = X \cdot U_{n\ jw}^2 / S_{n\ jw}$.

Przekładnia względna dla środkowego zaczeput: $\vartheta_0 = (407/400)/(27/27) = 1,0175$. Zakres regulacji przekładni: $\vartheta = 1,0174 \pm 7 \times 0,0125$, tj. $0,930 \leq \vartheta \leq 1,105$. Dla ogranicznika kąta mocy przyjęto $\delta_{max} = 90^\circ$.

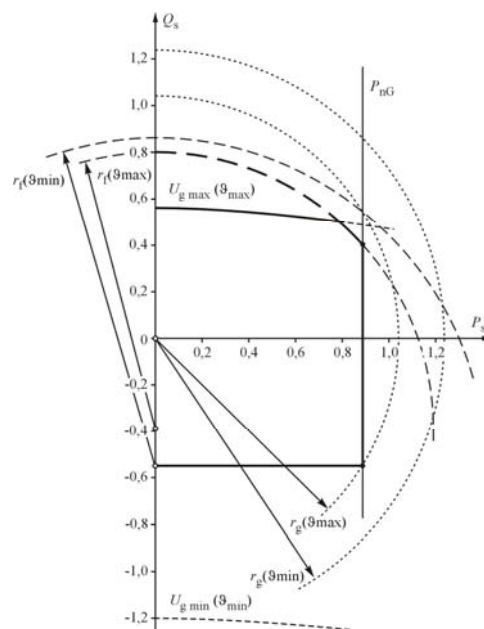
Dla transformatora o stałej przekładni otrzymuje się $\vartheta_0 = (420/400)/(27/27) = 1,05$.

Rys. 7a oraz Rys. 7b są wykonane dla przypadku, gdy napięcie sieci $U_s = 1,05 U_n$.

Rys. 7a dotyczy bloku z transformatorem o stałej przekładni. Widać, że w górnej (indukcyjnej) części znaczna część obszaru nie może być wykorzystana bez przekroczenia dopuszczalnego napięcia generatora. W dolnej (pojemnościowej) części ograniczenie wynikające z napięcia generatora powoduje tylko niewielkie ograniczenie możliwości pobierania mocy biernej, w stosunku do ograniczenia wynikającego z maksymalnego kąta obciążenia. Przy dotrzymaniu warunku (17) dostępny jest tylko obszar otoczony linią grubą ciągłą. Obszar otoczony linią grubą przerywaną jest dostępny przy przekroczeniu dopuszczalnych wartości napięcia generatora.



Rys. 7a. Granice dopuszczalnego obszaru pracy bloku z transformatorem bez regulacji przekładni przy $U_s = 1,05$ oraz $\vartheta = 1,05 = \text{const}$

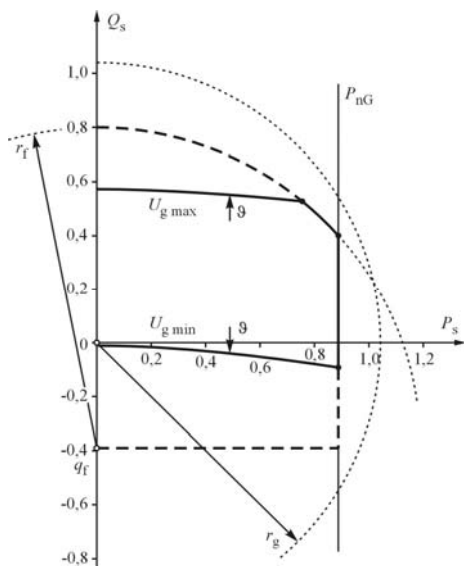


Rys. 7b. Granice dopuszczalnego obszaru pracy bloku z transformatorem z regulacją przekładni przy $U_s = 1,05$ oraz $0,93 < \vartheta \leq 1,105$

W omawianym przypadku napięcie sieci jest na maksymalnym poziomie i z punktu widzenia systemu elektroenergetycznego niedostępność górnej części obszaru ponad $U_{g\ max}$ nie musi być istotnym problemem

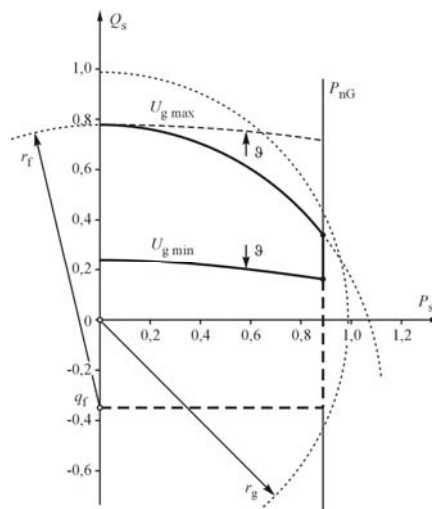
dla pracy systemu elektroenergetycznego, bo dodatkowa moc bierna w takim przypadku nie jest raczej potrzebna.

Na Rys. 7a pionowymi strzałkami pokazano w jakim kierunku przesuwać się będą łuki $U_{g \max}$ oraz $U_{g \min}$ przy odpowiednio zwiększaniu i zmniejszaniu przekładni.

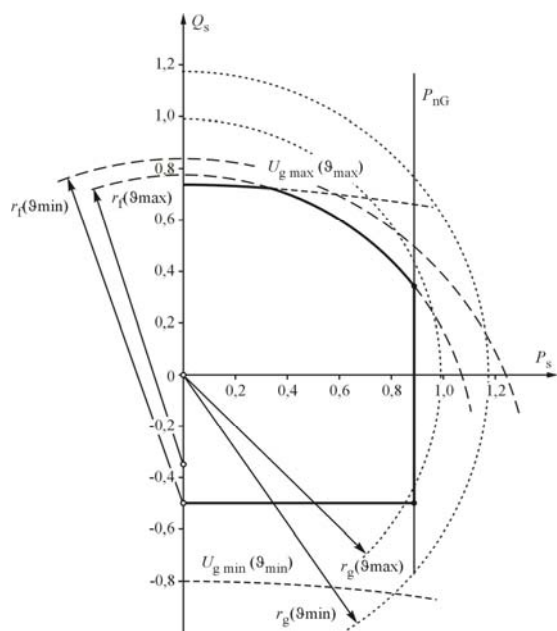


Rys. 8a. Granice dopuszczalnego obszaru pracy bloku z transformatorem bez regulacji przekładni przy $U_s = 1,00$ oraz $\vartheta = 1,05 = \text{const}$

regulator generatora wymusza zmniejszanie sem generatora i tym samym zmniejszanie napięcia generatora, co zgodnie z regułą regulacji (1a) powoduje zmniejszanie przekładni transformatora. Wskutek zmniejszania przekładni łuk $U_{g \min}$ obniża się i dla ϑ_{\min} wychodzi poza obszar wynikający z ograniczenia kąta obciążenia. Tym samym ograniczenie (17) przestaje mieć znaczenie. Dzięki regulacji przekładni dostępny jest cały obszar otoczony na Rys. 7b linią grubą ciągłą. Jak wynika z porównania Rys. 7b oraz Rys. 7a obszar uzyskiwany dzięki regulacji przekładni jest znacznie większy od obszaru przy braku regulacji.

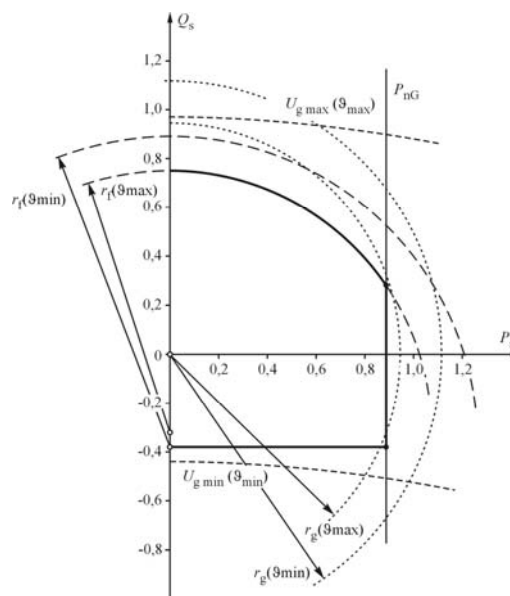


Rys. 9a. Granice dopuszczalnego obszaru pracy bloku z transformatorem bez regulacji przekładni przy $U_s = 0,95$ oraz $\vartheta = 1,05 = \text{const}$



Rys. 8b. Granice dopuszczalnego obszaru pracy bloku z transformatorem z regulacją przekładni przy $U_s = 1,00$ oraz $0,93 < \vartheta \leq 1,105$

Rys. 7b dotyczy bloku z transformatorem o regulowanej przekładni. W górnej (indukcyjnej) części obszaru przy zwiększaniu oddawania mocy biernej do systemu regulator generatora wymusza zwiększanie sem generatora i tym samym zwiększanie napięcie generatora, co zgodnie z regułą regulacji (1a) powoduje zwiększanie przekładni transformatora. Wskutek zwiększania przekładni łuk $U_{g \max}$ przesuwa się w górę powiększając dostępny obszar w zakresie mocy biernej. W dolnej (pojemnościowej) części przy zwiększaniu poboru mocy biernej z systemu,



Rys. 9b. Granice dopuszczalnego obszaru pracy bloku z transformatorem z regulacją przekładni przy $U_s = 0,95$ oraz $0,93 < \vartheta \leq 1,105$

Rys. 8a oraz Rys. 8b są wykonane dla przypadku, gdy napięcie sieci $U_s = 1,0 U_n$. W tym przypadku, w wariancie przy stałej przekładni warunek (17) mniej ogranicza górną (indukcyjną) część obszaru i możliwości zwiększenia mocy biernej są większe niż w poprzednim przypadku pokazanym na Rys. 7a. Pozwala to zwiększyć napięcie w sieci. Ograniczenie dolnej (pojemnościowej) części obszaru jest

większe. Nie ma możliwości pobierania mocy biernej z systemu, co przy przyjętym tu napięciu nie jest istotne, gdyż napięcie w sieci nie wymaga obniżenia. W tym przypadku regulacja przekładni (Rys. 8b) przesuwa ograniczenia $U_{g\max}$ oraz $U_{g\min}$ znacząco poza obszar wynikający z ograniczenia prądu wzbudzenia i kąta obciążenia.

Rys. 9a oraz Rys. 9b są wykonane dla przypadku, gdy napięcie sieci $U_s = 0,95U_n$. W tym przypadku w wariancie przy stałej przekładni warunek (17) ogranicza dolną (pojemnościową) część obszaru, co nie jest istotne, gdyż przy tak niskim napięciu w sieci pobieranie mocy biernej z sieci przez generator nie ma uzasadnienia. Również w tym przypadku regulacja przekładni (Rys. 9b) przesuwa ograniczenia $U_{g\max}$ oraz $U_{g\min}$ poza obszar wynikający z ograniczenia prądu wzbudzenia i kąta obciążenia.

Podsumowanie i wnioski

Zastosowanie transformatora blokowego z przekładnią regulowaną pod obciążeniem pozwala poszerzyć możliwości bloku generator-transformator w zakresie generacji i pobierania mocy biernej.

Przekładnia transformatora blokowego może być regulowana przez system nadrzędny ARNE lub autonomiczny regulator pracujący w trybie regulacji napięcia z martwą strefą i opóźnieniem czasowym. Napięciem regulowanym powinno być napięcie po dolnej stronie transformatora blokowego.

W artykule wyprowadzono wzory pozwalające na określenie dopuszczalnego obszaru pracy bloku generator-transformator z uwzględnieniem wartości przekładni transformatora blokowego. Podano przykład liczbowy ilustrujący wpływ zmian przekładni na przesuwanie się odpowiednich krzywych ograniczających dopuszczalny obszar pracy.

Stwierdzono, że głównym ograniczeniem w możliwościach bloku w zakresie generacji lub poboru mocy biernej, jest niewielki dopuszczalny zakres odchylenia napięcia generatora od wartości znamionowej. Regulacja przekładni transformatora blokowego może to ograniczenie przesunąć poza obszar wynikający z ograniczenia prądu wzbudzenia i kąta obciążenia.

Tym samym wykazano, że pozytywne oddziaływanie regulacji przekładni nie polega na powiększaniu dopuszczalnego obszaru pracy wynikającego z ograniczenia prądu wzbudzenia oraz kąta obciążenia, lecz na przesuwaniu ograniczeń wynikających z warunku nieprzekraczania dopuszczalnych wartości napięcia generatora.

LITERATURA

1. Machowski J., Bialek J. W., Bumby J. R.: "Power System Dynamics. Stability and Control". John Wiley & Sons, Chichester, New York, 2008, ISBN 978-0-470-72558-0
2. Machowski J.: Regulacja i stabilność systemu elektroenergetycznego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2007 r.

3. Kacejko P, Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych, wyd. II WNT, Warszawa 2009 r.
4. The Grid Code, Issue 4, rev 2, 22.03.2010, National Grid Electricity Transmission plc.
5. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Przesyłowej PSE – Operator SA <http://www.pse-operator.pl/>
6. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007r. w sprawie szczegółowego warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego. Dz. U. Nr 93, poz. 623 z dnia 29 maja 2007r.
7. Machowski J.: "Generator synchroniczny jako źródło mocy biernej przy dużych zmianach napięcia w systemie elektroenergetycznym" Przegląd Elektrotechniczny Nr 2, 2008r. ISSN 0033-2097 str. 39 – 45
8. Małkowski R., Szczërba Z., Zbroński A.: "Analiza możliwej koordynacji algorytmów działania regulatora transformatora blokowego i regulatora generatora" Acta Energetica Nr 4. 2011 str. 35-42
9. Szczërba Z.: "Układy regulacji transformatorów blokowych. Uzasadnienie stosowania lub niestosowania regulacji" PBZ Nr PBZ-MEiN-1/2/2006 „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju” Rola i dostosowanie automatyki przeciwwaryjnej i restytucyjnej. Raport z realizacji: Zad. 8, temat 8.4, pkt. 8.4.1 – Rola i dostosowanie automatyki przeciwwaryjnej i restytucyjnej. Wytwarzanie. Konsorcjum Politechnik: Gdańskiej, Śląskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej, Gdańsk, grudzień 2008
10. Zajczyk R., Klucznik J., Małkowski R., Szczeciński P.: "Układy regulacji generatorów. Stan obecny. Analiza – z uwzględnieniem stanów nienormalnych - zalecanych i niezbędnych zmian algorytmów działania regulatorów i stosowanych nastawień oraz transmitancji. PBZ Nr PBZ-MEiN-1/2/2006 „Bezpieczeństwo elektroenergetyczne kraju” Rola i dostosowanie automatyki przeciwwaryjnej i restytucyjnej. Raport z realizacji: Zad. 8, temat 8.4, pkt. 8.4.1 - Rola i dostosowanie automatyki przeciwwaryjnej i restytucyjnej. Wytwarzanie. Konsorcjum Politechnik: Gdańskiej, Śląskiej, Warszawskiej i Wrocławskiej, Gdańsk, grudzień 2008
11. Instytut Energetyki Oddział Gdańsk: "Mikroprocesorowy układ automatycznej regulacji napięcia i mocy biernej typu ARNE-2 - karta informacyjna"
12. John J. Paserba, Masaru Shimomura, Seiichi Tanaka, Donald J. Shoup, Robert T. Hellested: "Enhanced Generator Controls for the Improvement of Power System Voltage Stability" Symposium of Specialists in Electric Operational and Expansion Planning (VIII SEPOPE) Brasilia, Brazil, May 19-23, 2002
13. H. Kitamura, M. Shimomura, J. Paserba: "Improvement of Voltage Stability by the Advanced High Side Voltage Control Regulator" Proceedings of the 2000 IEEE PES Summer Meeting, Seattle, WA, July 2000, pg. 278-283.
14. Artur Zbroński (Politechnika Gdańska): "Adaptacyjny regulator transformatora blokowego (Adaptive Controller of Generator Transformer), XII International PhD Workshop, OWD 2010, 23–26 October 2010
15. Reimert D.: Protective relaying for power generation systems. CRS Press Taylor&Francis Group, 2006
16. IEEE C50.13-2005 IEEE Standard for Cylindrical-Rotor 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators Rated 10 MVA and Above

Autorzy:

prof. dr hab. inż. Jan Machowski, Politechnika Warszawska,
e-mail: jan.machowski@len.pw.edu.pl

prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko, Politechnika Lubelska,
e-mail: p.kacejko@pollub.pl