

Obszar pracy układu do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC

Streszczenie. W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia i analizę obszaru pracy układu UPQC. Obszar pracy jest to okrąg wyznaczony na płaszczyźnie zespolonej mocy pozornej \underline{S} określający możliwe do uzyskania w układzie wartości mocy czynnej P i mocy bierniej Q . Obszar ten został wyznaczony przy założeniu, że przebiegi napięć i prądów są sinusoidalne. Wyższe harmoniczne prądu i napięcia są pominięte. Obszar pracy został wyznaczony w funkcji wartości zastosowanych elementów RL oraz napięć i prądów występujących w układzie oraz sieci zasilającej.

Abstract. The article presents the method of determining and analyzing the working area of the UPQC system. The work area is a circle designated on the plane of complex apparent power S defining possible values of active power P and reactive power Q in the system. This area was determined assuming that the waveforms of voltages and currents are sinusoidal. Higher harmonics of current and voltage are omitted. The work area has been designated as a function of the value of the RL used and the voltages and currents present in the system and the supply network. (**The working area of the Unified Power Quality Conditioner for Power Quality Improvement.**)

Słowa kluczowe: obszar pracy UPQC, filtr aktywny równoległy i szeregowy, jakość energii elektrycznej.

Keywords: working area of the UPQC, active shunt and series filters, Power quality.

Wstęp

W artykule przedstawiono sposób wyznaczenia i analizę obszaru pracy układu UPQC. Obszar pracy jest to okrąg wyznaczony na płaszczyźnie zespolonej mocy pozornej \underline{S} określający możliwe do uzyskania w układzie wartości mocy czynnej P i mocy bierniej Q . Obszar ten został wyznaczony przy założeniu, że przebiegi napięć i prądów są sinusoidalne. Wyższe harmoniczne prądu i napięcia są pominięte. Obszar pracy został wyznaczony w funkcji wartości zastosowanych elementów RL oraz napięć i prądów występujących w układzie oraz sieci zasilającej.

Rozpatrywane są prądy i napięcia są uśrednione w przedziale czasu równym okresowi przełączeń. W rezultacie w rozważaniach można pominąć pulsacje będące wynikiem przełączeń. W analizie przebiegów sinusoidalnych wykorzystano wartości skuteczne zespolone, które odpowiadają tym przebiegom.

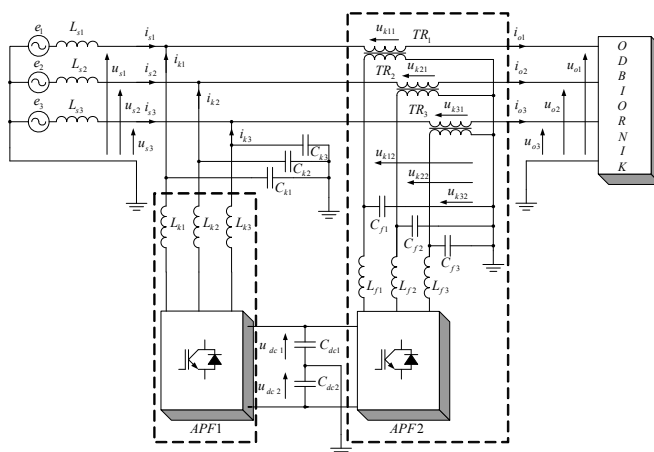
UPQC układ do poprawy jakości energii elektrycznej.

Układ UPQC jest zbudowany z dwóch układów filtrów aktywnych równoległego APF1 i szeregowego APF2 połączonych wspólnym obwodem prądu stałego [1][2]. Oba układy mogą pracować niezależnie. Na rysunku 1 pokazano schemat układu UPQC z podziałem na część równoległą i szeregową. Układ APF1 umożliwia: symetryzację prądu odbiornika, kompensację harmonicznych w prądzie odbiornika, kompensację mocy bierniej, kompensację szybkozmiennych wahań mocy czynnej, regulację napięcia w obwodzie pośredniczącym prądu stałego. Układ APF2 umożliwia: stabilizację i symetryzację napięcia na zaciskach odbiornika, kompensację harmonicznych w napięciu sieci zasilającej.

Rozpatrywany układ UPQC jest układem trójfazowym czteroprzewodowym, dlatego można go traktować jako trzy niezależne układy jednofazowe skojarzone w system trójfazowy. Dlatego działanie takiego układu UPQC można analizować upraszczając jego schemat do jednofazowego układu o odpowiednim napięciu fazowym i prądzie przewodowym.

Obszar pracy układu do poprawy jakości energii elektrycznej UPQC.

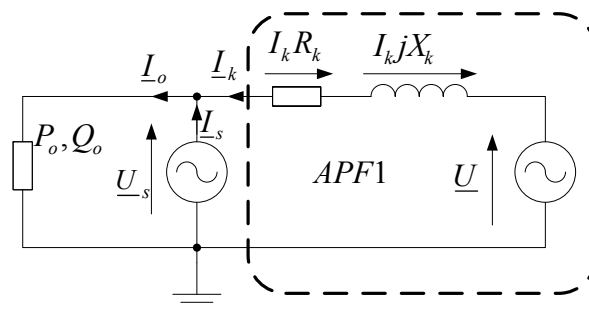
Obszar pracy UPQC można podzielić na dwie części. Obszar (zakres) pracy dla układu APF1 części równoległej UPQC oraz obszar (zakres) pracy dla układu APF2 części szeregowej UPQC.



Rys.1. Układ UPQC o konfiguracji równoległo – szeregowej.

Obszar pracy układu UPQC - część równoległa APF1

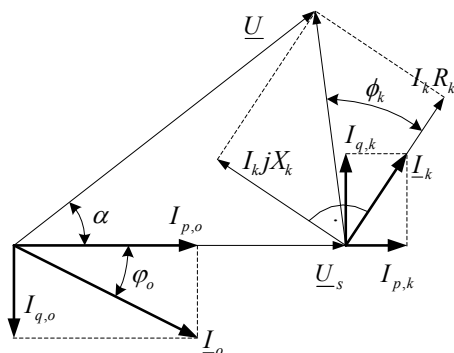
Na rysunku 2 pokazano schemat zastępczy jednej fazy układu APF1. Układ ten dołączony jest do sieci zasilającej \underline{U}_s oraz do odbiornika o mocy P_o, Q_o .



Rys.2. Schemat zastępczy układu APF1 dołączonego do sieci zasilającej \underline{U}_s i do odbiornika o mocy P_o, Q_o

Na schemacie zastępczym układ APF1 reprezentowany jest przez źródło napięcia \underline{U} oraz dławik sprężający o reaktancji X_k i rezystancji R_k . Schemat zastępczy odpowiada określonemu stanowi pracy układu, przy którym prąd sieci jest równy \underline{I}_s a napięcie sieci jest równe \underline{U}_s . Model nie uwzględnia impedancji sieci zasilającej oraz odpowiada pracy ustalonej układu, gdy wartość średnia napięcia w obwodzie prądu stałego liczona w przedziale czasu równym

okresowi napięcia sieci jest stała. Na rysunku 3 pokazano wykres wektorowy prądów i napięć dla schematu zastępczego z rysunku 2.



Rys.3. Wykres wektorowy dla jednej fazy odbiornika o mocy $P_o > 0$ i $Q_o > 0$ oraz jednej fazy układu APF1 o mocy $P_1 > 0$ i $Q_1 < 0$ ($Q_1 = -Q_o$)

Na wykresie przyjęto następujące oznaczenia: \underline{U} - wartość skuteczna zespolona wektora napięcia wyjściowego falownika, \underline{U}_s - wartość skuteczna zespolona wektora napięcia sieci zasilającej w miejscu dołączenia odbiornika i układu APF1, \underline{I}_o - wartość skuteczna zespolona wektora prądu fazowego odbiornika, $I_{p,o}$ - składowa czynna prądu fazowego odbiornika, $I_{p,o}$ - składowa bierna prądu fazowego odbiornika, φ_o - kąt fazowy odbiornika, \underline{I}_k - wartość skuteczna zespolona wektora kompensacyjnego prądu fazowego układu APF1, $I_{p,k}$ - składowa czynna kompensacyjnego prądu fazowego układu APF1, $I_{q,k}$ - składowa czynna kompensacyjnego prądu fazowego układu APF1, ϕ_k - kąt pomiędzy wektorem prądu kompensacyjnego \underline{I}_k a wektorem napięcia będącym różnicą wektorów \underline{U} i \underline{U}_s . Dla znanej wartości pulsacji ω wartość skuteczną zespoloną wektora prądu dodawczego \underline{I}_k można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad \underline{I}_k = \frac{\underline{U} - \underline{U}_s}{\underline{Z}_k}$$

gdzie: \underline{Z}_k - zespolona impedancja dławika sprzęgającego:

W celu wyznaczenia obszaru pracy układu APF1 należy wyznaczyć jego wyjściową zespoloną moc pozorną \underline{S}_1 :

$$(2) \quad \underline{S}_1 = \underline{U}_s \underline{I}_k^*$$

Na wyjściu falownika napięcia w układzie APF1 generowany jest dowolny wektor napięcia \underline{U} , który jest przesunięty o dowolny kąt α względem wektora napięcia sieci zasilającej \underline{U}_s :

$$(3) \quad \underline{U} = U \cos \alpha + jU \sin \alpha$$

Na podstawie zależności (1) i (3) wartość skuteczną zespoloną wektora prądu dodawczego \underline{I}_k opisuje zależność:

$$(4) \quad \underline{I}_k = Y_k^2 (R_k (U \cos \alpha - U_s) + X_k U \sin \alpha) + jY_k^2 (X_k (U_s - U \cos \alpha) + R_k U \sin \alpha)$$

Uwzględniając powyższe równania zespolona wyjściowa moc pozorną \underline{S}_1 układu APF1 wynosi:

$$(5) \quad \underline{S}_1 = U_s \left\{ Y_k^2 [R_k (U \cos \alpha - U_s) + X_k U \sin \alpha] \right\} + -jU_s \left\{ Y_k^2 [X_k (U_s - U \cos \alpha) + R_k U \sin \alpha] \right\}$$

Odpowiednio wyjściowa moc czynna P_1 i wyjściowa moc bierna Q_1 tego układu są równe:

$$(6) \quad P_1 = -Y_k^2 R_k U_s^2 + Y_k^2 U_s U (R_k \cos \alpha + X_k \sin \alpha)$$

$$(7) \quad Q_1 = -Y_k^2 X_k U_s^2 - Y_k^2 U_s U (R_k \sin \alpha - X_k \cos \alpha)$$

Przekształcając równania (6) i (7) otrzymuje się równanie okręgu na płaszczyźnie mocy pozornej we współrzędnych P_1, Q_1 :

$$(9) \quad (P_1 + Y_k^2 R_k U_s^2)^2 + (Q_1 + Y_k^2 X_k U_s^2)^2 = Y_k^2 U_s^2 U^2$$

o środku w punkcie o współrzędnych $(-Y_k^2 R_k U_s^2, -Y_k^2 X_k U_s^2)$ i promieniu równym $S_1 = Y_k U_s U$.

Napięcie źródłowe falownika jest U jest zależne od maksymalnego napięcia U_{dcmax} w obwodzie pośredniczącym prądu stałego:

$$(10) \quad U = U_{max} = \frac{U_{dcmax}}{\sqrt{2}}$$

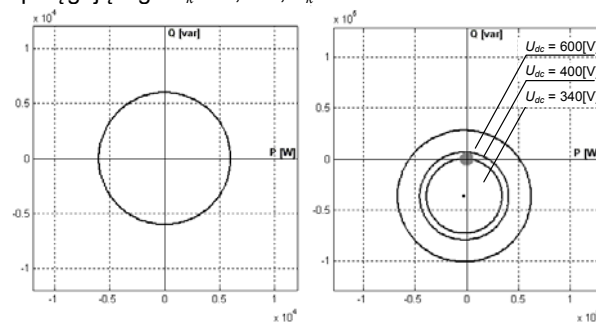
Stąd maksymalny teoretyczny moduł mocy pozornej jest równy:

$$(11) \quad S_{1max1} = Y_k \frac{U_s U_{dcmax}}{\sqrt{2}}$$

W rzeczywistym układzie maksymalna wartość modułu mocy pozornej S_1 ograniczona jest przez znamionową wartość prądu falownika napięcia I_{kmax} w układzie APF1:

$$(12) \quad S_{1max2} = U_s I_{kmax}$$

Na rysunku 4 pokazano obszar pracy układu APF1 wynikający z zależności (13) i (9) dla następujących parametrów: napięcie U_{dc} w obwodzie pośredniczącym falownika $U_{dc} = 340$ V, $U_{dc} = 400$ V, $U_{dc} = 600$ V, skuteczne napięcie sieci zasilającej w punkcie przyłączenia układu APF1 i odbiornika $U_s = 240$ V, parametry dławika sprzęgającego $R_k = 0,1 \Omega$, $L_k = 5$ mH.



a) Rys.4. Obszar pracy APF1 we współrzędnych (P, Q) ; a) rzeczywisty S_{1max2} , b) teoretyczny S_{1max1}

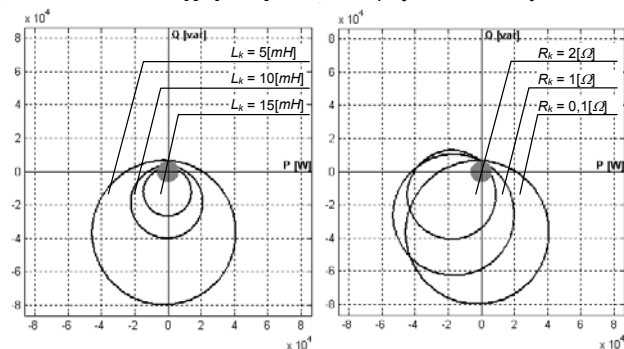
Dla przyjętej znamionowej wartości skutecznej wyjściowego prądu falownika $I_{kmax} = 25$ A dozwolony obszar pracy układu APF1 uwzględniający zależność (13), przedstawiono na rysunku 4a a maksymalna wartość modułu mocy pozornej układu jest równa $S_1 = S_{1max2} = 6000$ VA. Promień tego okręgu ze środkiem w początku układu współrzędnych zmienia się proporcjonalnie do tych wartości.

Możliwe do uzyskania teoretyczne obszary pracy układu APF1 w funkcji napięcia U_{dc} w obwodzie pośredniczącym falownika ilustrują okręgi przedstawione na rysunku 4b. Środki tych okręgów pokrywają się. Promienie tych okręgów równe S_{1max1} są znacznie dłuższe niż promień okręgu wyznaczonego dla znamionowych parametrów falownika w

układzie APF1 z rysunku 4a i zwiększają się ze wzrostem napięcia U_{dc} .

Dla napięć wyższych niż 340 V okręgi te leżą już częściowo nad osią P co oznacza, że układ może być źródłem mocy biernej o charakterze indukcyjnym.

Część wspólna okręgu przedstawionego na rysunku 4a i wybranego okręgu z rys. 4b wyznacza dostępny obszar pracy układu APF1 przy danym napięciu U_{dc} w obwodzie pośredniczącym falownika i danym znamionowym prądzie I_{kmax} . Dla wartości napięć U_{dc} wyższych od 400 V cały obszar przedstawiony na rysunku 4a i zaznaczony na rysunku 4b szarym kolorem leży wewnątrz okręgu wykreślonego dla danego napięcia U_{dc} . Obszar pracy układu APF1 ogranicza tutaj tylko przyjęty znamionowy skuteczny prąd falownika I_{kmax} . Dodatnia moc czynna P oznacza, że układ APF1 może być źródłem mocy czynnej a ujemna, że może być odbiornikiem mocy czynnej. W wypadku stałego napięcia w obwodzie pośredniczącym układ, który jest odbiornikiem mocy czynnej lub źródłem mocy czynnej jest to układ APF2. W innym wypadku tylko zmiana wartości napięcia w obwodzie pośredniczącym może generować moc czynną dodatnią lub ujemną. Dodatnia moc bierna Q oznacza, że układu APF1 ma charakter indukcyjny a ujemna, że pojemnościowy.



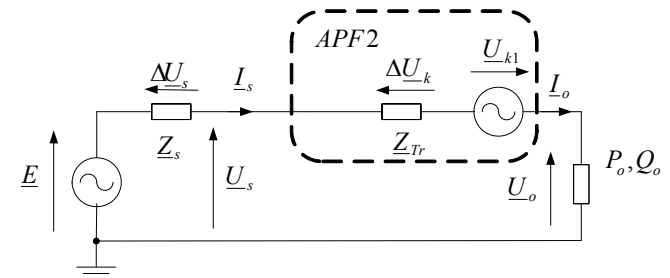
a) b)
Rys.5. Obszar pracy APF1 we współrzędnych (P_1, Q_1) w zależności od parametrów dławika sprzęgającego
a) indukcyjność L_k , b) rezystancja R_k

Na rysunku 5 pokazano wpływ parametrów dławika sprzęgającego na obszar pracy układu APF1. Na rysunku 5a zmienia się indukcyjności dławika L_k a parametrem stałym jest rezystancja uzwojenia $R_k = 0,1 \Omega$. Na rysunku 5b zmienia się rezystancja uzwojenia dławika a parametrem stałym jest jego indukcyjność $L_k = 5$ mH. Zwiększanie wartości indukcyjności L_k (rys.5a) lub rezystancji dławika R_k (rys.5b) powoduje zmniejszanie się obszaru pracy układu APF1. Wzrost wartości rezystancji uzwojenia dławika sprzęgającego R_k powoduje przesunięcie obszaru pracy układu w kierunku ujemnej mocy czynnej P .

W układzie UPQC pomiędzy układami APF1 i APF2 zachodzi wymiana energii związana z ładowaniem i rozładowywaniem kondensatorów C_{dc} w obwodzie pośredniczącym prądu stałego. Rysunek 5 wykonano przy założeniu, że układ APF1 jest źródłem prądu. Dodatnia moc czynna P oznacza, że energia z tego źródła jest oddawana do sieci, natomiast ujemna, że jest przez to źródło pobierana z sieci zasilającej. Przesunięcie obszaru pracy układu APF1 w kierunku ujemnej mocy czynnej P związane ze wzrostem wartości rezystancji uzwojeń oznacza, że układ ten musi więcej energii pobrać na pokrycie straty. Pokazany na rysunku 5 obszar zaznaczony kolorem szarym wyznacza dostępny zakres pracy APF1 wynikający z przyjętej znamionowej wartości prądu falownika I_{kmax} (rys.4a).

Obszar pracy układu UPQC - część szeregową APF2

Na rysunku 6 przedstawiono schemat zastępczy jednej fazy układu APF2. Układ ten reprezentowany jest przez źródło napięcia dodatkowego U_{k1} oraz impedancję uzwojeń transformatora dodatkowego Z_{Tr} sprowadzoną na stronę pierwotną tego transformatora. Sieć zasilająca reprezentowana jest przez impedancję Z_s i idealne źródło napięcia E .



Rys.6. Schemat zastępczy układu jednej fazy UPQC z uwzględnieniem układu APF2

Prąd odbiornika I_o powoduje spadek napięcia na reaktancji sieci zasilającej ΔU_s , stąd napięcie U_s w punkcie dołączenia układu APF2 jest równe:

$$(13) \quad U_s = E - \Delta U_s$$

Przy wyznaczaniu napięcia na zaciskach odbiornika U_o należy uwzględnić także spadek napięcia ΔU_k na impedancji uzwojeń transformatora dodatkowego Z_{Tr} spowodowany prądem odbiornika I_o . Uwzględniając powyższe założenia oraz, że generowane jest napięcie dodatkowe U_{k1} wartość skuteczną zespoloną odbiornika U_o opisuje równanie:

$$(14) \quad U_o = U_s - \Delta U_k + U_{k1}$$

Zespoloną moc pozorną S_2 określającą obszar pracy układu APF2 opisuje zależność:

$$(15) \quad S_2 = U_{k1} I_o^*$$

Na podstawie zależności (14) wartość skuteczną zespoloną wektora prądu przewodowego płynącego przez uzwojenia transformatora dodatkowego jest równa:

$$(16) \quad I_o = \frac{U_s - \Delta U_k + U_{k1}}{Z_z}$$

Gdzie Z_z zespolona impedancja wypadkowa. Wartość skuteczną zespoloną wektora napięcia dodatkowego przesuniętego względem wektora E o kąt β opisuje równanie:

$$(17) \quad U_{k1} = U_{k1} \cos \beta + j U_{k1} \sin \beta$$

Uwzględniając powyższe wartość skuteczną zespoloną prądu odbiornika opisana jest zależnością:

$$(18) \quad I_o = Y_z^2 (R_z (U_s + U_{k1} \cos \beta) + X_z U_{k1} \sin \beta) + j Y_z^2 (R_z U_{k1} \sin \beta - X_z (U_s + U_{k1} \cos \beta))$$

a zespoloną moc pozorną S_2 opisująca dopuszczalny zakres pracy APF2 jest równa:

$$(19) \quad S_2 = U_{k1} Y_z^2 (R_2 (U_s + U_{k1} \cos \beta) + X_z U_{k1} \sin \beta) + j U_{k1} Y_z^2 (R_2 U_{k1} \sin \beta - X_z (U_s + U_{k1} \cos \beta))$$

Stąd odpowiednio wyjściowa moc czynna P_2 i wyjściowa moc bierna Q_2 wynosi:

$$(20) \quad P_2 = \left[U_{k1}^2 R_z + U_{k1} U_s (R_z \cos \beta - X_z \sin \beta) \right] Y_z^2$$

$$(21) \quad Q_2 = \left[U_{k1}^2 X_z + U_{k1} U_s (R_z \sin \beta + X_z \cos \beta) \right] Y_z^2$$

Przekształcając równania powyższe równania otrzymuje się równanie okręgu na płaszczyźnie \underline{S}_2 we współrzędnych (P_2, Q_2) :

$$(22) \quad \left(P_2 - U_{k1}^2 R_z Y_z^2 \right)^2 + \left(Q_2 - U_{k1}^2 X_z Y_z^2 \right)^2 = \left(Y_z U_s U_{k1} \right)^2$$

o promieniu $(Y_z U_s U_{k1})$ i środku o w punkcie $(U_{k1}^2 R_z Y_z^2, U_{k1}^2 X_z Y_z^2)$.

Wektor napięcia dodatkowego \underline{U}_{k1} musi być wyznaczony z uwzględnieniem spadków napięć na impedancji sieci zasilającej, impedancji uzwojeń transformatora dodatkowego oraz wartości odchyłki napięcia ΔU w napięciu sieci zasilającej:

$$(23) \quad \underline{U}_{k1} = I_o (\underline{Z}_s + \underline{Z}_{Tr}) + \Delta U$$

gdzie: \underline{Z}_s – impedancja sieci zasilającej, \underline{Z}_{Tr} – impedancja uzwojeń transformatora dodatkowego sprowadzona na jego stronę pierwotną, ΔU - odchyłka napięcia sieci zasilającej od wartości znamionowej. Układ skompensuje te spadki napięcia gdy wartość skuteczna napięcia dodatkowego będzie równa:

$$(24) \quad \underline{U}_{k1} = Y_o^2 E (R_o - jX_o) (R_s + R_{Tr} + jX_s + jX_{Tr}) + \Delta U$$

Podobnie jak w układzie równoległym APF1 dostępny obszar pracy układu szeregowego APF2 jest ograniczony możliwościami obwodu pośredniczącego prądu stałego - wartością napięcia U_{dcmax} . Wartość skuteczna napięcia dodatkowego U_{k1max} po stronie pierwotnej transformatora dodatkowego Tr z uwzględnieniem przekładni napięciowej n_{Tr} jest równa:

$$(23) \quad U_{k1max} = \frac{n_{Tr} U_{dcmax}}{\sqrt{2}}$$

Kolejnym parametrem ograniczającym obszar pracy układu APF2 jest wartość skuteczna prądu przewodowego płynącego przez uzwojenia transformatora dodatkowego. Wartość skuteczna prądu I_o musi spełniać nierówność:

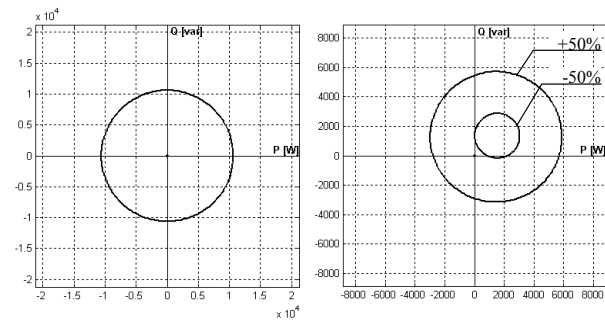
$$(24) \quad I_o < \frac{I}{n_{Tr}}$$

gdzie: I - znamionowy prąd skuteczny łącznika w gałęzi falownika. Dopuszczalny obszar pracy układu APF2 wynikający z parametrów znamionowych wyznaczony jest przez okrąg o środku w punkcie (0,0) i promieniu S_2 równym:

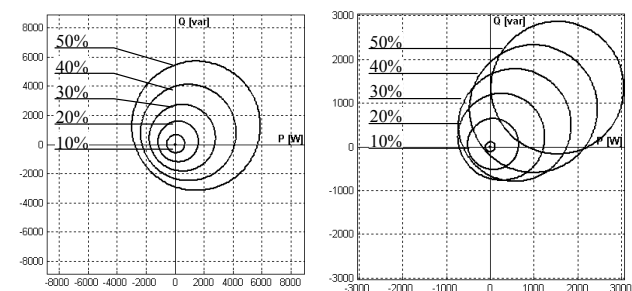
$$(25) \quad S_{2max} = \frac{U_{dcmax} I}{\sqrt{2}}$$

Przykładowe obszary pracy układu szeregowego APF2 przedstawiono na rysunku 6. Dla napięcia w obwodzie prądu stałego $U_{dcmax} = 600$ V i skutecznej wartości $I = 25$ A prądu znamionowego łączników falownika obszar pracy układu APF2 przedstawiono na rysunku 6a. W tym wypadku maksymalna wartość modułu mocy pozornej jest równa $S_{2max} = 10607$ VA. Na rysunku 6b pokazano obszar pracy układu APF2, gdy odbiornik ma charakter rezystancyjny a w sieci zasilającej wystąpił zapad napięcia

o 50% i wzrost napięcia o 50%. Do obliczeń przyjęto odbiornik o mocy $P_o = 6$ kW. Wykresy zostały sporządzone dla następujących parametrów sieci zasilającej: $E = 230$ V, $R_s = 0,01 \Omega$, $X_s = 0,157 \Omega$, transformatora dodatkowego: $R_{Tr} = 0,01 \Omega$, $X_{Tr} = 0,2826 \Omega$.



Rys.6. Obszar pracy układu APF2
a) $U_{dcmax} = 600$ V, $I = 25$ A b) zapad napięcia -50% , wzrost napięcia o 50%



Rys.7. Obszar pracy układu APF2 przy zadanych odchyłkach napięcia ΔU , a) wzrost napięcia, b) zapad napięcia

Wpływ zmian amplitudy napięcia sieci zasilającej ΔU na obszar pracy układu APF2 przedstawiono na rysunku 7. Na rysunku 7a pokazano przypadek, kiedy amplituda napięcia sieci zasilającej zwiększa się. Wraz ze wzrostem amplitudy zwiększa się obszar pracy układu APF2 oraz następuje wyraźne przesunięcie środka okręgu do pierwszej ćwiartki układu współrzędnych. Podobnie układ zachowuje się, gdy wystąpi w sieci zasilającej zapad napięcia.

Podsumowanie

Wyznaczenie i analiza obszaru pracy układu UPQC do poprawy jakości energii elektrycznej dla części równoległej APF) oraz części szeregowej APF2 umożliwia oszacowanie wartości elementów biernych wchodzących w skład tych układów pod kątem możliwych wystąpień zakłóceń w napięciu sieci zasilającej w postaci zapadów oraz przepięć. Ponadto w znając charakter oraz wartości mocy czynnej i biernej odbiornika można oszacować zarówno parametry znamionowe zastosowanych falowników jak i elementów w układach filtrów APF1 i APF2.

Autor: dr inż. Piotr Fabijański, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: Piotr.Fabijanski@ee.pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] Saurabh S. Jadhao; Gajanan P. Ratnaparkhi; G. M. Dhole; S. R. Paraskar, Voltage quality enhancement using unified power quality conditioner (UPQC), 2017 International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS) (2017), 3270-3274
- [2] Siddharthi LahuNikam; K. Kamal Sandeep, Analysis of modified three-phase four-wire UPQC design, 2017 Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM), (2017), 586-590