

RZECZPOSPOLITA  
POLSKA



Urząd Patentowy  
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY** (19) **PL** (11) **220156**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **394348**

(51) Int.Cl.  
**H02J 3/18 (2006.01)**

(22) Data zgłoszenia: **28.03.2011**

---

(54) **Sposób równoważenia napięć w obwodach napięcia stałego  
wielopoziomowego przekształtnika kaskadowego**

---

(43) Zgłoszenie ogłoszono:  
**08.10.2012 BUP 21/12**

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:  
**30.09.2015 WUP 09/15**

(73) Uprawniony z patentu:  
**POLITECHNIKA ŚLĄSKA, Gliwice, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:  
**MARCIN ZYGMANOWSKI, Gliwice, PL**  
**BOGUSŁAW GRZESIK, Gliwice, PL**

(74) Pełnomocnik:  
**rzecz. pat. Urszula Ziółkowska**

---

**PL 220156 B1**

## Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest sposób równoważenia napięć w obwodach napięcia stałego wielopoziomowego przekształtnika kaskadowego, zwłaszcza dla urządzeń poprawiających jakość energii elektrycznej.

Właściwa praca przekształtnika kaskadowego wymaga stosowania separowanych źródeł napięcia stałego. Najczęściej przekształtniki kaskadowe mają obwody napięcia stałego zasilane za pomocą prostowników przyłączonych do wielouzwojeniowego transformatora, który zapewnia separację galwaniczną we wszystkich obwodach napięcia stałego [Rodriguez J., Lai J.S., Peng F.Z.; *Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 4, Aug 2002].

W niektórych zastosowaniach, gdzie nie ma konieczności ciągłego przesyłu mocy czynnej z obwodu napięcia stałego, takich jak urządzenia do poprawy jakości energii (energoelektroniczny kompensator mocy biernej, filtr aktywny), stosowanie wielouzwojeniowego transformatora jest rozwiązaniem drogim. Lepszym rozwiązaniem jest zastosowanie w obwodach napięcia stałego kondensatorów, które powinny utrzymywać stałe napięcie [Peng F.Z., Lai J-S: *Multilevel Cascade Voltage Source Inverter with Separate DC Sources*. US Patent, US RE37126, Apr 3, 2001].

Stosując do sterowania przekształtnikiem kaskadowym metodę modulacji z sygnałami nośnymi przesuniętymi fazowo (ang. *Phase-Shifted Pulse Width Modulation*) zapewnia się względnie zrównoważone napięcia w obwodach napięcia stałego. Jednak zastosowanie tylko tej metody może okazać się niewystarczające w sytuacji, gdy w przekształtniku jego elementy składowe ( tranzystory, kondensatory) mają różne wartości parametrów, nawet jeśli różnice są dopuszczalne w granicach tolerancji.

Zapewnienie zrównoważonych napięć na kondensatorach obwodu napięcia stałego przekształtnika kaskadowego w przypadku, gdy występuje tendencja do ich niezrównoważenia, wymaga przekazywania mocy czynnej za pośrednictwem przekształtnika kaskadowego ze strony napięcia przemiennego. Moc czynna, w przypadku gdy przekształtnik kaskadowy generuje po stronie napięcia przemiennego prądy wyższych harmonicznych lub harmonicznej podstawowej, może być przekazywana tylko za pomocą takich harmonicznych napięć wyjściowych poszczególnych przekształtników mostkowych przekształtnika kaskadowego, które występują w prądzie. Wytworzenie napięcia strony napięcia przemiennego w przekształtniku mostkowym może jednak ingerować w całkowite napięcie strony napięcia przemiennego przekształtnika kaskadowego, a zatem może spowodować niewłaściwe jego działanie.

Znana jest z opisu patentowego US 7710082 metoda sterowania przekształtnika kaskadowego, która umożliwiła równoważenie napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego, jednak w tej metodzie, gdy istnieje potrzeba równoważenia tych napięć, na krótką chwilę, przekształtnik przestaje kontrolować prąd fazowy. W opatentowanej metodzie sygnały proporcjonalne do różnic napięć kondensatorów obwodów napięcia stałego wpływają na prądy fazowe pobierane z sieci zasilającej.

Sposób sterowania według wynalazku polega na tym, że dodaje się do napięcia strony napięcia przemiennego składowych przekształtników mostkowych dwa rodzaje dodatkowych składowych napięć równoważących napięcia kondensatorów o częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego, które w pierwszym przypadku są w fazie lub w przeciwfazie względem prądu fazowego danej fazy przekształtnika kaskadowego a ich amplitudy rozdziela się w zależności od różnic napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego tak, aby suma tych składowych wewnątrz każdej fazy przekształtnika była równa zero i napięcie fazowe przekształtnika kaskadowego nie zostało zmienione przez te składowe oraz w drugim rodzaju składowe równoważące napięcia kondensatorów są składowymi zerowej kolejności faz o częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego, które dodaje się do napięć strony napięcia przemiennego wszystkich przekształtników mostkowych z taką samą amplitudą zależną od różnic pomiędzy zsumowanymi wartościami napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego w poszczególnych fazach przekształtnika kaskadowego i przesunięciem fazowym takim, aby prądy fazowe wraz ze składowymi równoważącymi napięcia kondensatorów przekazywały moc czynną pomiędzy fazami przekształtnika kaskadowego wyrównując napięcia kondensatorów obwodu napięcia stałego bez ingerencji w napięcia międzyfazowe wytwarzane przez ten przekształtnik.

W sposobie sterowania według wynalazku przekształtnik wytwarza dodatkowe dwa rodzaje składowych napięć równoważących napięcia obwodu napięcia stałego, które przekazują moc czynną do lub z obwodu napięcia stałego. Dla pierwszego rodzaju składowe w danej fazie przekształtnika

wytwarzane są w taki sposób, aby ich suma równa była zero. W ten sposób metoda równoważenia napięć kondensatorów nie wpływa na napięcia fazowe i międzyfazowe, a zatem na działanie urządzenia, którego częścią składową jest przekształtnik kaskadowy. Powyższa metoda pozwala równoważyć napięcia kondensatorów obwodów napięcia stałego każdej fazy przekształtnika kaskadowego osobno za pomocą energii zgromadzonej w kondensatorach obwodu napięcia stałego danej fazy.

Składowe napięć równoważące napięcia kondensatorów drugiego rodzaju pozwalają na przekazywanie mocy czynnej pomiędzy fazami przekształtnika kaskadowego. Składowe napięć równoważące napięcia kondensatorów drugiego rodzaju również nie zakłócają pracy całego przekształtnika, a dzieje się to dzięki temu, że są one symetrycznymi składowej zerowej kolejności faz. W systemach trójfazowych trójprzewodowych wytworzenie w przekształtniku składowych symetrycznych zerowej kolejności faz nie wytwarza dodatkowych prądów, ale umożliwia przekazywanie między poszczególnymi fazami mocy czynnej.

W sposobie sterowania według wynalazku napięcie strony napięcia przemiennego przekształtnika kaskadowego i prądy fazowe tego przekształtnika, w przypadku uruchomienia procedury równoważenia napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego, pozostają niezmienione.

Przedmiot wynalazku przedstawiony został w przykładzie wykonania na rysunku, na którym fig. 1 przedstawia schemat trójfazowego filtra aktywnego z przekształtnikiem kaskadowym, fig. 2 – schemat przekształtnika mostkowego, fig. 3 – model elektryczny trójfazowego filtra aktywnego pokazujący, że napięcie fazowe przekształtnika kaskadowego jest sumą napięć strony napięcia przemiennego przekształtników mostkowych, fig. 4 – model obwodu elektrycznego przekształtnika kaskadowego z dodatkowymi źródłami napięć składowych równoważących napięcia kondensatorów pierwszego rodzaju, fig. 5 – napięcia przekształtników mostkowych wraz z dodatkowymi źródłami napięć składowych równoważących napięcia kondensatorów drugiego rodzaju, a fig. 6 – przedziały względem kąta przesunięcia fazowego wektora napięcia składowej równoważającej napięcia kondensatorów  $\underline{U}_{STZ}$  wraz z zaznaczeniem znaków mocy czynnej przenoszonej przy udziale tych składowych.

Trójfazowy filtr aktywny **B** z przekształtnikiem kaskadowym **D** fig. 1 przyłączony jest do sieci zasilającej **A** i chronionego odbiornika **C** za pomocą dławików sieciowych **G**. Przekształtnik kaskadowy **D** składa się z szeregowo połączonych przekształtników mostkowych **E**, których liczba w danej fazie wynosi  $n$ . Przekształtnik kaskadowy zbudowany z  $n$  przekształtników mostkowych ma  $2n+1$  poziomów napięć. Każdy z przekształtników mostkowych **E** (fig. 2) przyłączony jest do kondensatora obwodu napięcia stałego **F**.

Trójfazowy filtr aktywny **B** można przedstawić za pomocą modelu elektrycznego na fig. 3. Każdy przekształtnik mostkowy o numerze  $x = (1, 2, \dots, n)$  w fazie  $M = (A, B, C)$  wytwarza napięcie  $u_{fMx}$ . Przesył energii elektrycznej pomiędzy obwodem prądu przemiennego **A**, a kondensatorem obwodu napięcia stałego **F** w każdym przekształtniku mostkowym odbywa się za pomocą napięcia strony napięcia przemiennego tego przekształtnika  $u_{fMx}$  i prądu fazowego przekształtnika kaskadowego  $i_{fM}$ . Proces ładowania lub rozładowania kondensatora może odbywać się tylko wtedy, gdy po stronie napięcia przemiennego przekształtnika mostkowego moc czynna jest niezerowa, czyli gdy napięcie strony napięcia przemiennego przekształtnika mostkowego ma taką samą częstotliwość, co prąd fazowy  $i_{fM}$ , a jego przesunięcie fazowe jest różne od  $\pm 90^\circ$ . W przekształtniku kaskadowym pracującym w układzie filtra aktywnego napięcia strony napięcia przemiennego przekształtników mostkowych, z pominięciem składowych kompensujących straty mocy, są przesunięte względem prądów fazowych o kąt równy  $90^\circ$ .

Żeby możliwe było przekazywanie mocy czynnej pomiędzy przekształtnikami mostkowymi, do napięć strony napięcia przemiennego, które są wymagane przez układ filtra aktywnego, dodawane są odpowiednie składowe równoważące napięcia kondensatorów  $u_{STMx}$  (fig. 4). Składowe te nazywa się składowymi równoważącymi napięcia kondensatorów pierwszego rodzaju. Warunkiem na to żeby składowe równoważące napięcia kondensatorów nie wpływały na prąd fazowy przekształtnika jest to żeby napięcie fazowe przekształtnika kaskadowego było równe  $u_{fM}$ , czyli suma napięć składowych równoważających powinna być równa zero. Składowe równoważące napięcia kondensatorów  $u_{STMx}$  mają przesunięcia fazowe zgodne lub przeciwne do przesunięcia fazowego prądu  $i_{fM}$ , co zapewnia, najwyższą szybkość równoważenia napięć, która zależęć będzie jedynie od amplitudy tych składowych. Amplitudę poszczególnych składowych równoważających napięcia kondensatorów  $\underline{U}_{STMxm}$  określa się za pomocą wzoru (1).

$$U_{STMm} = -k_{PST1} \left( u_{DCMx} - \frac{\sum_{k=1}^n u_{DCMk}}{n} \right) \quad (1)$$

gdzie  $k_{PST1}$  jest współczynnikiem proporcjonalnym określającym szybkość z jaką następuje równoważenie napięć kondensatorów **F**. Kąt przesunięcia fazowego napięć składowych równoważących napięcia kondensatorów  $u_{STMx}$  jest taki sam jak prądu fazowego  $i_{fM}$ . Znak minus we wzorze wskazuje na to, że dla przekształtników mostkowych, których napięcia kondensatorów obwodu napięcia stałego są większe od wartości średniej tych napięć w danej fazie, składowa  $u_{STMx}$  ma amplitudę ujemną a co oznacza, że napięcie to jest przesunięte o  $180^\circ$  względem prądu fazowego i źródło napięcia składowej równoważającej napięcia kondensatorów oddaje moc czynną do pozostałych przekształtników mostkowych. Można zauważyć, że suma wszystkich amplitud  $n$  napięć składowych równoważających napięcia kondensatorów równa jest zero (2).

$$\sum_{k=1}^n U_{STMkm} = -k_{PST1} \left( \sum_{k=1}^n u_{DCMk} - \sum_{k=1}^n u_{DCMk} \right) = 0 \quad (2)$$

To sprawia, że napięcia składowych  $u_{STMx}$  nie wpływają na napięcie fazowe przekształtnika kaskadowego  $u_{fM}$ . Po zadziałaniu układu sterowania z metodą równoważenia napięć kondensatorów obwodów napięcia stałego w przekształtniku kaskadowym napięcia tych kondensatorów będą równe odpowiednio  $u_{DCA1} = u_{DCA2} = \dots = u_{DCAx} = U_{DCA}$  dla fazy A, dla fazy B  $u_{DCB1} = u_{DCB2} = \dots = u_{DCBx} = U_{DCB}$  i dla fazy C  $u_{DCC1} = u_{DCC2} = \dots = u_{DCCx} = U_{DCC}$ , przy czym napięcia  $U_{DCA}$ ,  $U_{DCB}$  i  $U_{DCC}$  w wyniku działania tej metody mogą pozostać różne.

Aby wyrównać napięcia kondensatorów **F** w poszczególnych fazach przekształtnika kaskadowego **D** stosuje się metodę równoważenia napięć kondensatorów wykorzystującą składowe równoważące napięcia kondensatorów drugiego rodzaju  $u_{STZ}$ , które są składowymi zerowej kolejności faz o częstotliwości podstawowej harmonicznej prądu. Składowe  $u_{STZ}$  dodawane są do napięć wszystkich przekształtników mostkowych we wszystkich trzech fazach (fig. 5), a ich kąt przesunięcia fazowego zależy od kąta przesunięcia fazowego prądu w poszczególnych fazach i od sum napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego poszczególnych faz. Z uwagi na to, że filtr aktywny pełniący funkcję kompensatora mocy bierniej powoduje przepływ biernego prądu przesuniętego o  $90^\circ$  względem napięcia sieci zasilającej, istnieją określone przedziały kąta przesunięcia fazowego składowej  $u_{STZ}$ , dla której moce czynne związane ze składową równoważającą napięcia kondensatorów drugiego rodzaju i prądami fazowymi przekształtnika mają różne znaki. Na fig. 6 zaznaczono przedziały kąta przesunięcia fazowego wektora napięcia składowej  $u_{STZ}$  wraz z zaznaczeniem znaków mocy czynnej dostarczanej do danej fazy przekształtnika kaskadowego,  $P_A$ ,  $P_B$  i  $P_C$ . Największa moc czynna dostarczana jest do tej fazy M, dla której kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem prądu tej fazy  $i_{fM}$  i wektorem napięcia składowej  $u_{STZ}$  jest najmniejszy. Konstrukcja napięcia składowej  $u_{STZ}$  zależna jest od różnic w napięciach poszczególnych faz oraz kąta przesunięcia fazowego prądów (prąd bierny indukcyjny lub prąd bierny pojemnościowy). Przyjmując, że kompensator z przekształtnikiem kaskadowym pobiera prąd bierny pojemnościowy, to wektor składowej  $u_{STZ}$  określa się jako sumę wektorów współfazowych z wektorami prądów fazowych  $i_{fM}$ .

$$\underline{u}_{STZ} = k_{PST2} \left( \left( U_{DCABC} - \sum_{k=1}^n u_{DCAk} \right) \underline{i}_{fA} + \left( U_{DCABC} - \sum_{k=1}^n u_{DCBk} \right) \underline{i}_{fB} + \left( U_{DCABC} - \sum_{k=1}^n u_{DCCk} \right) \underline{i}_{fC} \right) \quad (3)$$

gdzie:  $U_{DCABC} = \frac{\sum_{M=A,B,C} \sum_{k=1}^n u_{DCMk}}{3}$  jest średnią sumą napięć fazach A, B, C.

W przypadku, gdy suma wszystkich napięć kondensatorów jest różna od zadanej wartości  $3nU_{DC}$ : przekazywana jest do lub z filtru aktywnego moc czynna, która ma za zadanie utrzymać sumę wszystkich napięć równą  $3nU_{DC}$ . Za realizację tego zadania odpowiedzialny jest klasyczny regu-

lator stosowany w przekształtnikach z jednym obwodem napięcia stałego (dwupoziomowych), który w przekształtniku kaskadowym stabilizuje sumę wszystkich napięć obwodu napięcia stałego.

Zaletą sterowania według wynalazku jest możliwość równoważenia napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego  $n$ -poziomowego przekształtnika kaskadowego bez ingerowania w realizowane przez przekształtnik napięcia międzyfazowe oraz prądy fazowe. W porównaniu do rozwiązania z transformatorem wielouzwojeniowym zaletą rozwiązania ze sterowaniem według wynalazku jest to, że nie stosuje się drogiego i stosunkowo dużego transformatora.

Cechą charakterystyczną tej metody jest konieczność pomiaru wielu napięć kondensatorów. Problem ten jest jednak typowym problemem występującym w przekształtnikach wielopoziomowych, gdzie niejednokrotnie w układzie sterowania występuje konieczność pomiaru kilkunastu lub kilkudziesięciu wielkości równocześnie.

Właściwością sterowania według wynalazku jest to, że do równoważenia napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego konieczny jest przepływ prądu fazowego przekształtnika. Problem ten nie występuje w przypadku, gdy przekształtnik kaskadowy pracuje w układzie kompensatora mocy biernej przy poborze lub generowaniu niezerowej mocy biernej.

### Zastrzeżenie patentowe

Sposób równoważenia napięć w obwodach napięcia stałego wielopoziomowego przekształtnika kaskadowego, **znamienny tym**, że dodaje się do napięcia strony napięcia przemiennego składowych przekształtników mostkowych dwa rodzaje dodatkowych składowych napięć równoważących napięcia kondensatorów o częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego, które w pierwszym przypadku są w fazie lub w przeciwfazie względem prądu fazowego danej fazy przekształtnika kaskadowego a ich amplitudy rozdziela się w zależności od różnic napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego tak, aby suma tych składowych wewnątrz każdej fazy przekształtnika była równa zero i napięcie fazowe przekształtnika kaskadowego nie zostało zmienione przez te składowe oraz w drugim rodzaju składowe równoważące napięcia kondensatorów są składowymi zerowej kolejności faz o częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia zasilającego, które dodaje się do napięć strony napięcia przemiennego wszystkich przekształtników mostkowych z taką samą amplitudą zależną od różnic pomiędzy zsumowanymi wartościami napięć kondensatorów obwodu napięcia stałego w poszczególnych fazach przekształtnika kaskadowego i przesunięciem fazowym takim, aby prądy fazowe wraz ze składowymi równoważącymi napięcia kondensatorów przekazywały moc czynną pomiędzy fazami przekształtnika kaskadowego wyrównując napięcia kondensatorów obwodu napięcia stałego bez ingerencji w napięcia międzyfazowe wytwarzane przez ten przekształtnik.

Rysunki

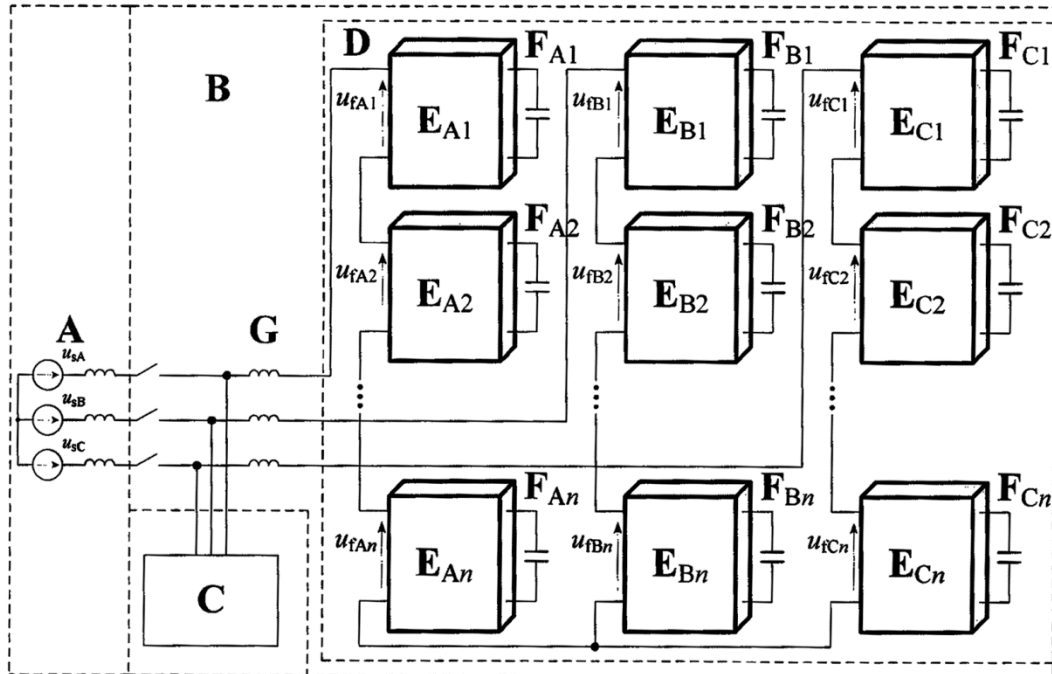


Fig. 1

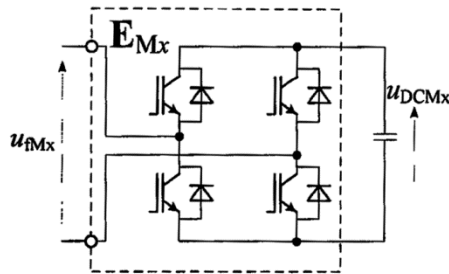


Fig. 2

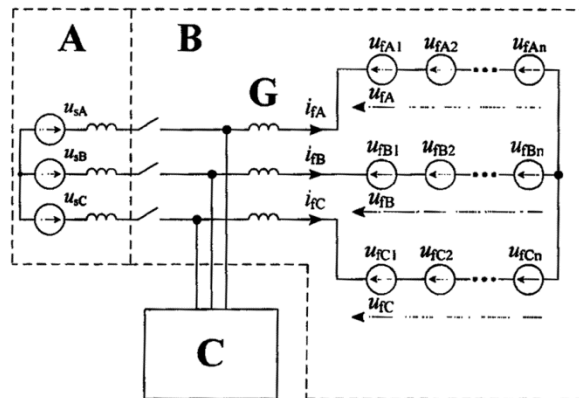


Fig. 3

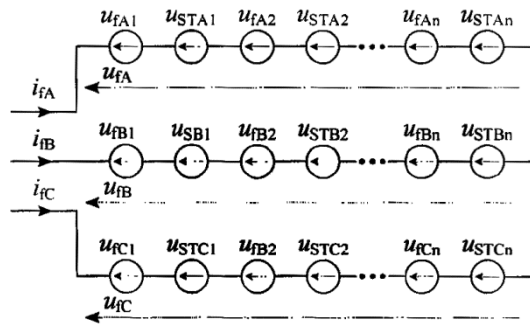


Fig. 4

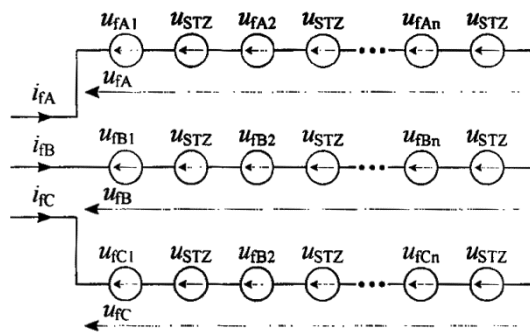


Fig. 5

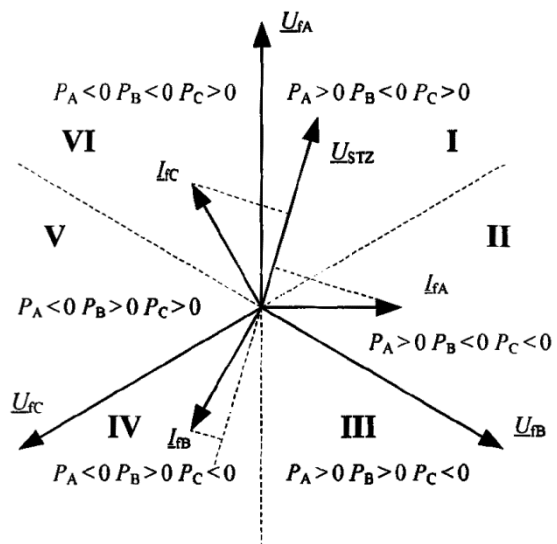


Fig. 6

