

(19)



URZĄD
PATENTOWY
RZECZYPOSPOLITEJ
POLSKIEJ

(10) **PL 245231 B1**

(12)

Opis patentowy

(21) Numer zgłoszenia: **441901**

(22) Data zgłoszenia: **2022.08.01**

(43) Data publikacji o zgłoszeniu: **2024.02.05 BUP 06/2024**

(45) Data publikacji o udzieleniu patentu: **2024.06.03 WUP 23/2024**

(51) MKP:

H02J 3/12 (2006.01)

H02J 3/04 (2006.01)

H02M 7/00 (2006.01)

H02K 21/00 (2006.01)

(73) Uprawniony z patentu:

**POLITECHNIKA MORSKA W SZCZECINIE,
Szczecin, PL**

(72) Twórca(-y) wynalazku:

**DARIUSZ TARNAPOWICZ, Szczecin, PL
SERGEY GERMAN-GALKIN, Szczecin, PL
ARKADIUSZ NERC, Szczecin, PL**

(74) Pełnomocnik:

rzecz. pat. Monika Wielecka, Szczecin, PL

(54) Tytuł:

**Układy sterowania napięciem w hybrydowym systemie z prądnicą synchroniczną
o magnesach trwałych (PMSG)**

PL 245231 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku są układy sterowania napięciem w hybrydowym systemie z prądnicą synchroniczną o magnesach trwałych (PMSG) (Permanent Magnet Synchronous Generator) w celu utrzymania stałego napięcia obciążenia. Układy według wynalazku mogą znaleźć zastosowanie w obiektach z zespołami prądotwórczymi, takich jak: pojazdy elektryczne hybrydowe, turbiny wiatrowe, samoloty i morskie zespoły prądotwórcze itp.

Prądnice PMSG, na których wirniku osadzone są magnesy ziem rzadkich wypierają maszyny ze wzbudzeniem elektromagnetycznym w układach mechatronicznych w zakresie mocy od kilku watów do kilkudziesięciu megawatów. Wynika to przede wszystkim z wysokiej niezawodności tych maszyn, dobrej wydajności energetycznej, zmniejszonej wagi i wymiarów.

W przypadku stosowania PMSG jako generatora elektrycznego nie ma możliwości regulacji napięcia wzbudzenia (brak AVR), co powoduje spadek napięcia na wyjściu generatora ze wzrostem obciążenia.

Znany jest z opis patentowego CN104852651 układ oparty na dodatkowej konstrukcji osłabiającej strumień magnesnicy PMSG pozwalający na stabilizację napięcia. Niedogodnością tego układu jest ingerencja w klasyczną technologię PMSG ograniczającą zalety PMSG.

Znany jest z opisu wynalazku US 2015/0076823 układ utrzymywania stałych parametrów napięcia sieci odbiorczej ze źródła (PMSG) poprzez włączony szeregowo między źródło, a sieć odbiorczą przekształtnik energoelektroniczny. Niedogodnością tego układu jest zwiększona zawodność związana z szeregowo włączonym przekształtnikiem. Każda awaria przekształtnika powoduje blackout w systemie elektroenergetycznym sieci odbiorczej. Niedogodnością tego układu są zwiększone straty i zmniejszenie jakości energii elektrycznej w sieci w aspekcie odkształcenia napięcia.

Jednym ze sposobów stabilizacji napięcia PMSG w układach autonomicznych (Tarnapowicz D. German-Gałkin S. *Mechatronic System with the Control of Voltage in Permanent Magnet Synchronous Generator*. New Trends in Production Engineering, 2018, strona 531–537, ISSN 2545–2843) jest metoda wykorzystująca ideę generowania ujemnej mocy biernej dla utrzymania stałego napięcia w sieci. Niedogodnością tej metody jest ograniczenie jakości stabilizacji napięcia wynikająca z założenia, że w stanie ustalonym rezystancja uzwojeń stojana jest dużo mniejsza od reaktancji uzwojeń stojana ($r \ll x$). Ma to szczególne znaczenie w pracy równoległej PMSG.

Znane są sposób i układ stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych z polskiego zgłoszenia patentowego nr. P.430166, w którym to rozwiązaniu nie zaproponowano układu sterowania aktywnym konwerterem (falownikiem) pozwalającym na utrzymanie zadanego napięcia w sieci odbiorczej.

Problemem technicznym znanym z powszechnie stosowanych rozwiązań jest włączenie szeregowo pomiędzy PMSG, a odbiornik przekształtnika energoelektronicznego w celu utrzymywania stałego napięcia na odbiorniku, co wykazuje zawodność systemu w przypadku awarii przekształtnika. Inne przedstawione rozwiązania charakteryzują się ingerencją w technologię wykonania PMSG, co zwiększa koszty oraz układami generującymi ujemną moc bierną z ograniczoną stabilnością napięcia odbiornika. W proponowanym rozwiązaniu problem ten nie występuje.

Układ sterowania napięciem w hybrydowym systemie z prądnicą synchroniczną o magnesach trwałych (PMSG), według wynalazku, charakteryzuje się tym, że blok PMSG połączony jest blokiem obciążenia, a sygnał wyjściowy prądów stojana PMSG, sygnał wyjściowy kąta położenia wirnika oraz sygnał wyjściowy pomiaru napięcia i mocy biernej bloku obciążenia są połączone z blokiem sterownika procesorowego, w którym realizowane są sygnały prądów zadanych, których wyjście z bloku sterownika procesorowego i sygnał wyjściowy kąta położenia wirnika są połączone z blokiem drugiego sterownika procesorowego realizującego sygnały chwilowych prądów zadanych zgodnie z transformatą Clarka-Parka. Wyjście sygnału chwilowych prądów zadanych z bloku drugiego sterownika procesorowego i wyjście sygnału prądów rzeczywistych z bloku aktywnego konwertera są połączone z blokiem regulatorów histerezowych prądów chwilowych, gdzie określone są sygnały sterujące dla bloku aktywnego konwertera, który jest podłączony z blokiem źródła DC i blokiem obciążenia. Wyjście sygnału z bloku regulatorów histerezowych prądów chwilowych połączone jest z blokiem aktywnego konwertera.

W innym wariantcie wynalazku układ sterowania napięciem w hybrydowym systemie z prądnicą synchroniczną o magnesach trwałych PMSG, według wynalazku, charakteryzuje się tym, że blok PMSG połączony jest z blokiem obciążenia, przy czym wychodzące z bloku PMSG sygnał wyjściowy prądów

stojana PMSG i sygnał wyjściowy kąta położenia wirnika połączone są z blokiem sterownika procesorowego, gdzie realizowane są, zgodnie z transformatą Clarka-Parka, sygnały prądów stojana PMSG w układzie współrzędnych wirujących synchronicznie o osiach podłużnej i poprzecznej. Wyjście sygnałów prądów w osi podłużnej i osi poprzecznej z bloku pierwszego sterownika procesorowego są połączone z dwoma blokami filtrów dolnoprzepustowych tłumiącymi te sygnały, które połączone są z wejściem na blok drugiego sterownika procesorowego określającego sygnał kąta między wektorem siły elektromotorycznej i napięciem odbiornika, który połączony jest z wyjściem sygnału napięcia bloku obciążenia. Wyjście sygnału tego kąta z bloku drugiego sterownika procesorowego i wyjście sygnału prądu w osi podłużnej z bloku pierwszego sterownika procesorowego oraz wyjście sygnału mocy biernej obciążenia i wyjście sygnału napięcia obciążenia bloku obciążenia połączone są z blokiem trzeciego sterownika procesorowego określającego prądy zdane konwertera aktywnego. Wyjście sygnału prądu z bloku trzeciego sterownika procesorowego i wyjście sygnału kąta z bloku drugiego sterownika procesorowego są połączone z blokiem czwartego sterownika procesorowego wyznaczającym prądy zadane w osi podłużnej i osi poprzecznej. Wyjście sygnału kąta położenia wirnika z bloku PMSG i wyjście sygnałów prądów zadanych osi podłużnej i osi poprzecznej z bloku czwartego sterownika procesorowego połączone są z blokiem piątego sterownika procesorowego gdzie określone są zadane chwilowe prądy. Wyjście sygnałów zadanych chwilowych prądów z bloku piątego sterownika procesorowego i wyjście sygnałów prądów rzeczywistych z bloku aktywnego konwertera są połączone z blokiem regulatorów histerezy prądów chwilowych gdzie realizowane są sygnały sterujące dla bloku aktywnego konwertera, do którego jest podłączony blok źródła DC i blok obciążenia. Wyjście sygnału z bloku regulatorów histerezy prądów chwilowych połączone jest z blokiem aktywnego konwertera.

Układ kompensacji spadku napięcia na wyjściu PMSG według wynalazku opiera się o kryterium utrzymania stałego napięcia na odbiorniku przy zmianie trybu pracy generatora ze stanu biegu jałowego do wartości maksymalnej prądu obciążenia. Kryterium te sprowadza się do zrównania siły elektromotorycznej generatora E_G i napięcia odbiornika U_L przy zmiennym prądzie generatora I_G ($E_G = U_L = \text{const}$, przy $I_G = \text{var}$), co wymaga generowania ujemnej (pojemnościowej) mocy biernej w tworniku generatora. Moc ta dostarczana jest przez blok aktywnego konwertera połączony równolegle z generatorem do wspólnego bloku obciążenia. Utrzymywane jest stałe napięcie w sieci elektrycznej (na obciążeniu) przy zmianie wielkości i charakteru obciążenia. Blok aktywnego konwertera generuje prąd bierny większy niż wymagany obciążeniem. W tym przypadku generator obciążony jest ujemną (pojemnościową) mocą bierną.

Układ według wynalazku charakteryzuje się tym, że układ sterowania umożliwia generowanie przez blok aktywnego konwertera takiego prądu, który pozwala kompensować wpływ reakcji twornika wywołany przez prąd obciążenia. Sterowanie jest realizowane dzięki modelom matematycznym układu mechatronicznego PMSG z blokiem aktywnego konwertera opisanym w układzie współrzędnych wirujących synchronicznie o osiach podłużnej d , poprzecznej q współrzędnych d, q . Oś d pokrywa się ze strumieniem wirnika, natomiast oś q z wektorem siły elektromotorycznej stojana E_G (co referencyjne pokazano na Fig. 3).

Kompensację realizuje się przez wyznaczenie wartości prądu sterowania blokiem aktywnego konwertera jako:

$$I_{ACd}^* = I_{AC}^* \cos \varphi_m, \quad I_{ACq}^* = -I_{AC}^* \sin \varphi_m \quad (1)$$

$$I_{AC}^* = I_{Ix} - I_{Gx} = I_{Ix} - \frac{I_{Gd}}{\cos \varphi_m} \quad (2)$$

$$\varphi_m = \arcsin \frac{r_G I_{Gx} + x_G \cdot I_{Gy}}{U_L} \quad (3)$$

W równaniach (1, 2, 3) prąd $I_{Ix} = \frac{Q_L}{1.5U_L}$ to mierzony prąd bierny obciążenia, a I_{Gx}, I_{Gy} to wyznaczone na podstawie funkcji trygonometrycznych prądy stojana PMSG (co referencyjne pokazano na Fig. 3).

Wyznaczone w oparciu o prądy I_{AC}^* prądy zadane w osi podłużnej I_d^* i w osi poprzecznej I_q^* przekształcane są za pomocą transformaty Clarka-Parka na prądy zadane I_{ABC}^* dla sterowania blokiem aktywnego konwertera.

Zaletą układów według wynalazku jest to, że budowa systemu sterowania układu z PMSG zgodnie z wynalazkiem pozwoli na zwiększenie niezawodności systemu w porównaniu z obecnie powszechnie stosowanymi systemami stabilizacji napięcia (układami z podłączonym między PMSG, a odbiornik konwerterem), oraz jakości stabilizacji napięcia. Wynalazki pozwalają na zwiększenie niezawodności i jakości napięcia odbiornika.

Wynalazek jest bliżej przedstawiony w poniższych przykładach wykonania i na rysunku, na którym Fig. 1 przedstawia układ w pierwszym wariantcie, Fig. 2 przedstawia układ w drugim wariantcie, a Fig. 3 przedstawia wykres wektorowy napięć i prądów układu stabilizacji napięcia wg wynalazku.

Przykład I

W klasycznym okrętowym agregacie prądotwórczym z silnikiem wysokoprężnym z elektromagnetycznym generatorem synchronicznym aktywna moc elektryczna na wyjściu jest utrzymywana przez regulator obrotów silnika Diesla, a moc elektryczna wyjściowa bierna przez regulator napięcia wzbudzenia samego generatora.

W układzie blok prądnicy PMSG 1 połączony jest blokiem obciążenia 2. Sygnał prądów PMSG $I_{G(ABC)}$, sygnał kąta położenia wirnika Θ oraz sygnał pomiaru napięcia U_L i mocy biernej Q_L bloku obciążenia 2 są połączone z blokiem pierwszego sterownika procesorowego 3 w którym realizowane są sygnały prądów zadanych osi podłużnej I_d^* i osi poprzecznej I_q^* zgodnie z przyjętym w przykładzie wykonania przedmiotu wynalazku rozwiązaniem. Sygnały prądów zadanych osi podłużnej I_d^* i osi poprzecznej I_q^* wychodzące z bloku pierwszego sterownika procesorowego 3 i sygnał kąta położenia wirnika Θ z PMSG 1 są połączone z blokiem drugiego sterownika procesorowego 4 realizującego sygnały prądów zadanych I_{ABC}^* zgodnie z transformatą Clarka-Parka.

Sygnały chwilowych prądów zadanych I_{ABC}^* wychodzących z bloku drugiego sterownika procesorowego 4 i sygnały prądów rzeczywistych I_{ABC} (wychodzące z bloku aktywnego konwertera 5) są porównywane w bloku regulatorów histerezowych 6 prądów chwilowych, gdzie określane są sygnały sterujące dla bloku aktywnego konwertera 5. Do bloku aktywnego konwertera 5 jest podłączony blok źródła DC 7. Blok aktywnego konwertera 5 połączony jest z blokiem obciążenia 2.

Układ opisany powyżej działa następująco: Na podstawie znanych parametrów PMSG (r_G , x_G) oraz wielkości charakteryzujących stan ustalony pracy systemu PMSG – Odbiornik (prądy stojana PMSG $I_{G(ABC)}$, napięcie odbiornika U_L , moc bierna odbiornika Q_L i kąt położenia wirnika Θ) w pierwszym sterowniku procesorowym według wynalazku wyznaczane są prądy zadane w osi podłużnej I_d^* i poprzecznej I_q^* . W drugim sterowniku procesorowym w oparciu o pomiar kąta położenia wirnika za pomocą odwrotnej transformaty Clarka-Parka wyznaczane są prądy zadane dla aktywnego konwertera I_{ABC}^* . W układzie regulatora histerezowego wypracowywane są sygnały sterujące dla aktywnego konwertera włączonego równolegle do odbiornika, który według wynalazku utrzymuje stabilność napięcia odbiornika.

$\vec{E}_G$ – wektor siły elektromotorycznej PMSG

$\vec{I}_{AC}^*$ – wektor prądu aktywnego konwertera (pierwsza harmoniczna)

$\vec{I}_L$ – wektor prądu obciążenia

$\vec{I}_G$ – wektor prądu stojana PMSG

x_G , r_G – reaktancja i rezystancja stojana PMSG

Przykład II

W układzie blok prądnicy PMSG 1 połączony jest blokiem obciążenia 2. W układzie sygnał prądów stojana PMSG $I_{G(ABC)}$ i sygnał kąta położenia wirnika Θ połączony jest z blokiem pierwszego sterownika procesorowego 3 gdzie realizowane są, zgodnie z transformatą Clarka-Parka, sygnały prądów stojana PMSG 1 w osiach podłużnej d , poprzecznej q .

Sygnały prądów osi podłużnej I_d i osi poprzecznej I_q wychodzące z bloku pierwszego sterownika procesorowego 3 są połączone z dwoma blokami filtrów dolnoprzepustowych 8, gdzie sygnały prądów są tłumione. Do bloku drugiego sterownika procesorowego 4 jest podłączony z sygnałem napięcia obciążenia U_L bloku obciążenia 2. Sygnały prądów wychodzące z bloków filtrów dolnoprzepustowych 8 połączone są z blokiem drugiego sterownika procesorowego 4 gdzie określany jest sygnał kąta φ_m . Sygnał kąta φ_m wychodzący z bloku drugiego sterownika procesorowego 4 i sygnał prądu I_d wychodzący z bloku pierwszego sterownika procesorowego 3 oraz sygnały mocy biernej obciążenia Q_L i napięcia obciążenia U_L wychodzące z bloku obciążenia 2 połączone są z blokiem trzeciego sterownika procesorowego 9 określającym prądy zdane konwertera aktywnego I_{AC}^* .

Sygnał prądu I_{AC}^* wychodzący z bloku trzeciego sterownika procesorowego 9 i sygnał kąta φ_m wychodzący z bloku drugiego sterownika procesorowego 4 są połączone z blokiem czwartego sterownika procesorowego 10, w którym wyznaczane są prądy zadane I_d^* i I_q^* . Sygnał wskaźnika położenia wału Θ wychodzący z bloku 1 (PMSG) i sygnały prądów zadanych osi podłużnej I_d^* i osi poprzecznej I_q^* wychodzące z bloku czwartego sterownika procesorowego 10 połączone są z blokiem piątego sterownika procesorowego 11, gdzie określone są zadane prądy chwilowe I_{ABC}^* . Sygnały chwilowych prądów zadanych I_{ABC}^* wychodzących z bloku piątego sterownika procesorowego 11 i sygnały prądów rzeczywistych I_{ABC} wychodzących z bloku aktywnego konwertera 5 są połączone z blokiem regulatorów histerezy 6 prądów chwilowych, gdzie realizowane są sygnały sterujące dla bloku aktywnego konwertera 5. Do bloku aktywnego konwertera 5 jest podłączony blok źródła DC 7. Blok aktywnego konwertera 5 połączony jest z blokiem obciążenia 2.

Układ opisany powyżej działa następująco: Na podstawie znanych parametrów PMSG (r_G , x_G) oraz wielkości charakteryzujących stan ustalony pracy systemu PMSG – Odbiornik (prądy stojana PMSG $I_{G(ABC)}$ i kąt położenia wirnika Θ) w pierwszym sterowniku procesorowym z uwzględnieniem transformaty Clarka-Parka wyznaczane są sygnały prądów generatora w osi podłużnej I_d i poprzecznej I_q . Sygnały prądów generatora w osi podłużnej i poprzecznej poprzez filtry dolnoprzepustowe tłumiącymi te sygnały wchodzi do drugiego sterownika procesorowego, gdzie według wynalazku z uwzględnieniem napięcia odbiornika wyznaczany jest kąt między wektorem siły elektromotorycznej i napięciem odbiornika φ_m . W trzecim sterowniku procesorowym z uwzględnieniem sygnału napięcia odbiornika, sygnału prądu w osi podłużnej i sygnału mocy biernej gdzie według wynalazku jest wyznaczany sygnał prądu aktywnego konwertera I_{AC}^* . Sygnał prądu aktywnego konwertera I_{AC}^* wychodzący z trzeciego sterownika procesorowego i sygnał φ_m wychodzący z drugiego sterownika procesorowego wchodzi do czwartego sterownika procesorowego w którym według wynalazku wyznaczane są prądy zadane w osiach podłużnej I_d^* i osi poprzecznej I_q^* . W piątym sterowniku procesorowym dzięki sygnałom zadany prądów w osiach podłużnej i poprzecznej oraz w oparciu o pomiar kąta położenia wirnika z uwzględnieniem odwrotnej transformaty Clarka-Parka wyznaczane są prądy zadane dla aktywnego konwertera I_{ABC}^* . W układzie regulatora histerezy wypracowywane są sygnały sterujące dla aktywnego konwertera włączonego równolegle do odbiornika, który według wynalazku utrzymuje stabilność napięcia odbiornika.

Zastrzeżenia patentowe

1. Układ sterowania napięciem w hybrydowym systemie z prądnicą synchroniczną o magnesach trwałych (PMSG), **znamienny tym**, że blok PMSG (1) połączony jest blokiem obciążenia (2), a sygnał wyjściowy prądów stojana PMSG ($I_{G(ABC)}$), sygnał wyjściowy kąta położenia wirnika (Θ) oraz sygnał wyjściowy pomiaru napięcia (U_L) i mocy biernej (Q_L) bloku obciążenia (2) są połączone z blokiem pierwszego sterownika procesorowego (3), w którym realizowane są sygnały prądów zadanych (I_d^* i I_q^*), których wyjście z bloku pierwszego sterownika procesorowego (3) i sygnał wyjściowy kąta położenia wirnika (Θ) są połączone z blokiem drugiego sterownika procesorowego (4) realizującego sygnały chwilowych prądów zadanych (I_{ABC}^*) zgodnie z transformatą Clarka-Parka, zaś wyjście sygnału chwilowych prądów zadanych (I_{ABC}^*) z bloku drugiego sterownika procesorowego (4) i wyjście sygnału prądów rzeczywistych (I_{ABC}) z bloku aktywnego konwertera (5) są połączone z blokiem regulatorów histerezy (6) prądów chwilowych, gdzie określone są sygnały sterujące dla bloku aktywnego konwertera (5), który jest podłączony z blokiem źródła DC (7) i blokiem obciążenia (2), przy czym wyjście sygnału z bloku regulatorów histerezy (6) prądów chwilowych połączone jest z blokiem aktywnego konwertera (5).
2. Układ sterowania napięciem w hybrydowym systemie z prądnicą synchroniczną o magnesach trwałych PMSG (1), **znamienny tym**, że blok PMSG (1) połączony jest z blokiem obciążenia (2), przy czym wychodzące z bloku PMSG (1) sygnał wyjściowy prądów ($I_{G(ABC)}$) stojana PMSG (1) i sygnał wyjściowy kąta położenia wirnika (Θ) połączone są z blokiem pierwszego sterownika procesorowego (3), gdzie realizowane są, zgodnie z transformatą Clarka-Parka, sygnały prądów stojana PMSG (1) w układzie współrzędnych wirujących synchronicznie o osiach podłużnej (d) i osi poprzecznej (q), zaś wyjście sygnałów prądów w osi podłużnej (I_d) i osi poprzecznej (I_q) z bloku pierwszego sterownika procesorowego (3) są połączone z dwoma

blokami filtrów dolnoprzepustowych (8) tłumiącymi te sygnały, które połączone są z wejściem na blok drugiego sterownika procesorowego (4) określającego sygnał kąta (φ_m) między wektorem siły elektromotorycznej (E_G) i wektorem napięcia odbiornika (U_L), który połączony jest z wyjściem sygnału napięcia (U_L) bloku obciążenia (2), zaś wyjście sygnału tego kąta (φ_m) z bloku drugiego sterownika procesorowego (4) i wyjście sygnału prądu osi podłużnej (I_d) z bloku pierwszego sterownika procesorowego (3) oraz wyjście sygnału mocy biernej obciążenia (Q_L) i wyjście sygnału napięcia obciążenia (U_L) bloku obciążenia (2) połączone są z blokiem trzeciego sterownika procesorowego (9) określającego prąd aktywnego konwertera (I_{AC}), natomiast wyjście sygnału prądu (I_{AC}) z bloku trzeciego sterownika procesorowego (9) i wyjście sygnału kąta (φ_m) z bloku drugiego sterownika procesorowego (4) są połączone z blokiem czwartego sterownika procesorowego (10) wyznaczającym prądy zadane osi podłużnej (I_d) i osi poprzecznej (I_q), przy czym wyjście sygnału wskaźnika położenia wirnika (Θ) z bloku PMSG (1) i wyjście sygnałów prądów zadanych osi podłużnej (I_d) i osi poprzecznej (I_q) z bloku czwartego sterownika procesorowego (10) połączone są z blokiem piątego sterownika procesorowego (11) gdzie określone są zadane chwilowe prądy (I_{ABC}), zaś wyjście sygnałów zadanych chwilowych prądów (I_{ABC}) z bloku piątego sterownika procesorowego (11) i wyjście sygnałów prądów rzeczywistych (I_{ABC}) z bloku aktywnego konwertera (5) są połączone z blokiem regulatorów histerezowych (6) prądów chwilowych gdzie realizowane są sygnały sterujące dla bloku aktywnego konwertera (5), do którego jest podłączony blok źródła DC (7) i blok obciążenia (2), przy czym wyjście sygnału z bloku regulatorów histerezowych (6) prądów chwilowych połączone jest z blokiem aktywnego konwertera (5).

Rysunki

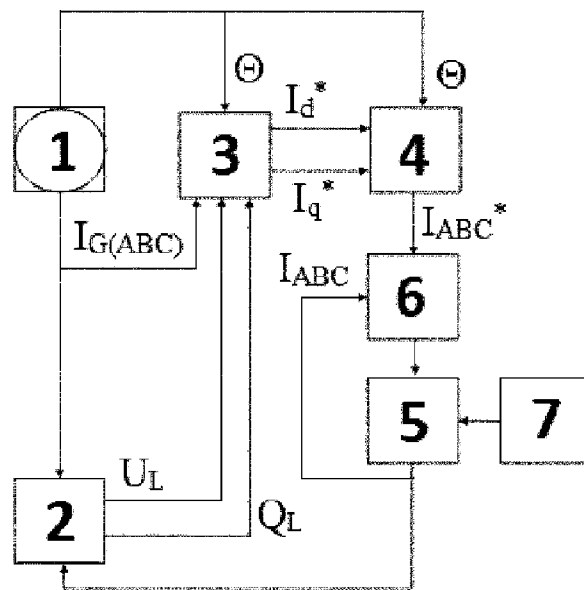


Fig. 1

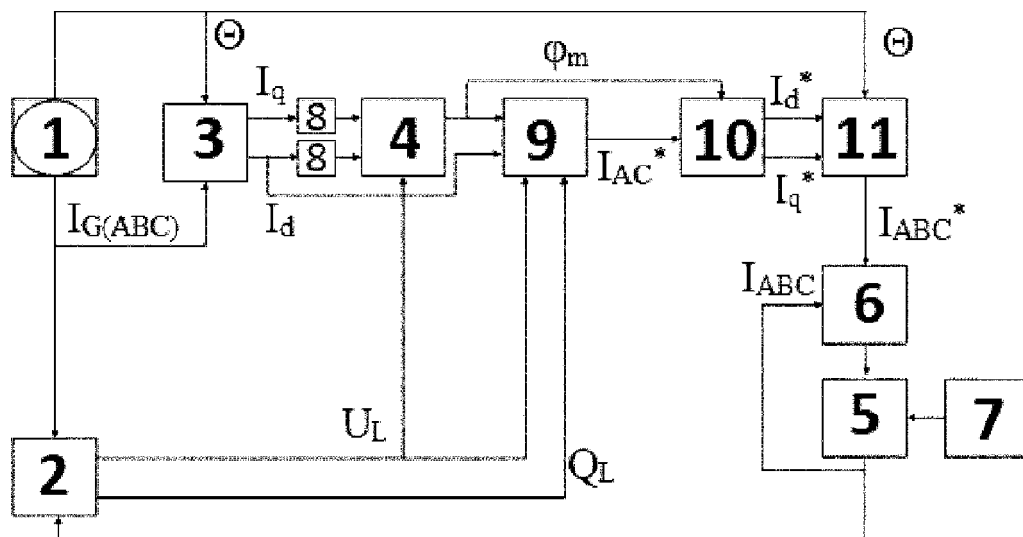


Fig. 2

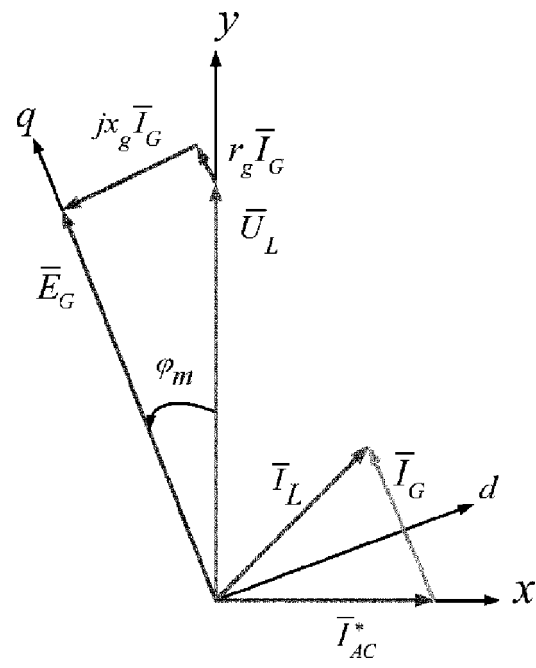


Fig. 3