

RZECZPOSPOLITA
POLSKA



Urząd Patentowy
Rzeczypospolitej Polskiej

(12) **OPIS PATENTOWY**

(19) **PL**

(11) **241441**

(13) **B1**

(21) Numer zgłoszenia: **430166**

(22) Data zgłoszenia: **06.06.2019**

(51) Int.Cl.

H02P 9/44 (2006.01)

B63J 3/02 (2006.01)

(54) **Układ stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych**

(43) Zgłoszenie ogłoszono:
14.12.2020 BUP 26/20

(45) O udzieleniu patentu ogłoszono:
03.10.2022 WUP 40/22

(73) Uprawniony z patentu:

**AKADEMIA MORSKA W SZCZECINIE,
Szczecin, PL**

(72) Twórca(y) wynalazku:

**DARIUSZ TARNAPOWICZ, Szczecin, PL
SERGIEJ GERMAN-GALKIN, Szczecin, PL**

PL 241441 B1

Opis wynalazku

Przedmiotem wynalazku jest układ stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych, który może być wykorzystywany do stabilizacji częstotliwości i napięcia w sieciach miękkich. Układ stabilizacji częstotliwości i napięcia generatorów z magnesami trwałymi według wynalazku może być wykorzystany we wszystkich sieciach miękkich (wydzielonych, elastycznych). Przykładem wykorzystania mogą być samochody z napędem hybrydowym, sieci elektryczne samolotowe, autonomiczne sieci elektroenergetyczne okrętowe i lądowe.

W niezależnych rozgałęzionych sieciach elektroenergetycznych powszechnie stosowane są autonomiczne zespoły prądotwórcze (DG) składające się z silnika spalinowego (D) i prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (G). W przypadku gdy moc nominalna odbiorów jest porównywalna z mocą zespołów prądotwórczych taka sieć jest „czuła” na dynamiczne i statyczne zmiany obciążenia. Jest nazywana siecią miękką (wydzieloną lub elastyczną). Każde włączenie odbiornika dużej mocy (szczególnie silników klatkowych, które charakteryzują się dużym prądem rozruchowym) powoduje odchylenie częstotliwości i napięcia. Sposobem powszechnie stosowanym dla utrzymania nominalnych parametrów w sieci z zespołami prądotwórczymi DG są regulatory. Za powrót częstotliwości do częstotliwości nominalnej po wystąpieniu odchylenia odpowiada regulator obrotów silnika spalinowego. Za powrót napięcia do napięcia nominalnego po wystąpieniu zapadu napięcia odpowiada regulator napięcia prądnicy synchronicznej. Przepisy ściśle precyzują maksymalną możliwą wartość i czas trwania odchylenia częstotliwości w sieciach miękkich. Przykładowo dla autonomicznych sieci lądowych krótkotrwałe odchylenie częstotliwości wynosi $\pm 4\%$ (PN-EN 61000-2-4). W sieciach okrętowych obowiązują przepisy które precyzują wartości maksymalne krótkotrwałego odchylenia częstotliwości do $\pm 10\%$ przy czasie trwania do 5 s i długotrwałego odchylenia częstotliwości do $\pm 5\%$ oraz krótkotrwałego odchylenia napięcia do $\pm 20\%$ przy czasie trwania do 1.5 s i długotrwałego odchylenia napięcia $+ 6\% - 10\%$ (IEC 60092-101 Electrical installations in ships – Part 101: Definitions and general requirements). Pomimo regulacji przepisami jakość energii elektrycznej w takich sieciach jest wyraźnie zmniejszona w porównaniu do sieci sztywnych.

Znany jest z patentu nr US 2015/0076823 *Wind turbine permanent magnet synchronous generator (wt-pmsg) system* 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 (w przypadku sieci autonomicznej). Niedogodnością tego układu są zwiększone straty i zmniejszenie jakości energii elektrycznej w sieci w aspekcie odkształcenia napięcia. Znany jest z patentu nr US 8,072,190 *Permanent magnet generator control* układ do utrzymywania napięcia na stałym poziomie poprzez włączenie równolegle do PMSG falownika. Niedogodnością tego układu jest brak możliwości reakcji na krótkotrwałe odchylenia częstotliwości PMSG (stan przejściowy) przy włączaniu odbiorników dużej mocy.

W stanie techniki z opisu patentowego CN106628040A znany jest układ, który opiera się na magazynach energii mechanicznej „flywheel”, które charakteryzują się wysoką prędkością kątową i bardzo dużą bezwładnością. Układ ten co prawda będzie mógł stabilizować prędkość, ale praktycznie tylko w stanie statycznym (po bardzo długim czasie) ze względu na bardzo dużą bezwładność koła zamachowego i nie może być wykorzystany do dynamicznych zmian prędkości wału prądnicy związanych z nagłym jej obciążeniem.

Z publikacji DE3445535A1 znany jest układ okrętowej prądnicy wałowej. W takich układach moc prądnicy jest około 20 razy mniejsza niż moc silnika spalinowego napędzającego prądnicę, w związku z tym zmiana obciążenia prądnicy nie wpływa na prędkość wału silnika spalinowego.

Rozwiązanie według wynalazku natomiast dotyczy zespołu Diesel-Generator, w którym silnik spalinowy jest praktycznie tej samej mocy co prądnica, a zmiana prędkości obrotowej silnika spalinowego wynika z gwałtownych obciążeń prądnicy mocą czynną. Należy podkreślić, że układ według DE3445535A1 nie może kompensować nagłych zmian prędkości silnika spalinowego (stanów zmian dynamicznych), natomiast rozwiązanie według wynalazku – dzięki odprężonej kontroli przepływu mocy czynnej i biernej z układu energoelektronicznego – umożliwi kompensację spadku częstotliwości w stanach dynamicznych (do ok. 1–2 sekundy) i spadku napięcia w stanach dynamicznych i statycznych.

Nadto stabilizacja parametrów elektrycznych w układzie według DE3445535A1 dotyczy prądnicy synchronicznej ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (z AVR). Wynalazek zaś dotyczy prądnicy synchronicznej z magnesami trwałymi, która nie posiada AVR.

Istotą układu stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych składających się z silnika spalinowego z regulatorem obrotów i generatora synchronicznego z magnesami trwałymi jest to, że składa się on z prostownika aktywnego, falownika oraz superkondensatora, które są włączone równolegle z silnikiem spalinowym, regulatorem obrotów i generatorem synchronicznym do sieci rozdzielczej o zmiennym obciążeniu, gdzie układ sterowania falownikiem zawiera moduł stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych. Prostownik aktywny i falownik jest realizowany w topologii mostkowej opartej o w pełni sterowane elementy półprzewodnikowe – tranzystory IGBT. Idea działania układu stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych polega na tym, że włącza się równolegle do sieci układ stabilizacji, który umożliwia stabilizację częstotliwości w stanach przejściowych przy jednoczesnej stabilizacji napięcia w stanach przejściowych i ustalonych.

Celem wynalazku jest wyeliminowanie niedogodności wcześniejszych rozwiązań oraz poprawę pracy zespołów D-PMSG w stanach przejściowych (odchylenie częstotliwości) przy jednoczesnej możliwości utrzymywania nominalnego poziomu napięcia w stanach przejściowych i ustalonych (zapady napięcia, długotrwałe odchylenie napięcia). Celem wynalazku jest również wyeliminowanie niedogodności związanych z pogorszeniem jakości energii elektrycznej występującej w przedstawionych rozwiązaniach. Zastosowanie w autonomicznych zespołach prądotwórczych prądnicy z magnesami trwałymi (PMSG) pozwala zwiększyć sprawność zespołu w szerokim zakresie obciążenia, a co za tym idzie zwiększyć efektywność ekonomiczną i zmniejszyć emisję zanieczyszczeń powietrza emitowaną przez zespół do atmosfery. Dodatkowo PMSG w porównaniu do prądnic ze wzbudzeniem elektromagnetycznym charakteryzuje się większą niezawodnością (ze względu na budowę kompaktową, brak zewnętrznych układów wzbudzenia, brak regulatora napięcia) i niskim poziomem wibracji. Charakterystyka zewnętrzna PMSG wykazuje zmiany napięcia wraz ze zmianą obciążenia w stanach ustalonych. Niedogodnością stosowania PMSG jest brak regulatora napięcia. Sposobem stosowanym powszechnie z PMSG jest podłączenie szeregowo między prądnicę, a sieć odbiorczą przekształtnika energoelektronicznego, który utrzymuje stałe parametry napięcia w sieci odbiorczej w przypadku zmiany obciążenia i zmiany prędkości obrotowej PMSG (częstotliwości napięcia).

Przedmiot wykonania przedstawiono na rysunku, gdzie fig. 1 przedstawia układ stabilizacji częstotliwości i napięcia w elektroenergetycznej sieci miękkiej. Oznaczenia figur rysunku: 1 – Silnik napędowy zespołu prądotwórczego – Diesel, 2 – Regulator prędkości obrotowej silnika, 3 – Prądnica z magnesami trwałymi, 4 – Prostownik aktywny, 5 – Falownik, 6 – Superkondensator, 7 – Zmienne obciążenie sieci elektroenergetycznej, 8 – Układ stabilizacji napięcia i częstotliwości, 9 – Sieć elektroenergetyczna miękka.

Stabilizacja częstotliwości napięcia PMSG według wynalazku polega na włączeniu równolegle do sieci 9 układu stabilizacji 8 pozwalającego na stabilizację częstotliwości w stanach przejściowych przy jednoczesnej stabilizacji napięcia w stanach przejściowych i ustalonych. Za stabilizację częstotliwości w stanach ustalonych odpowiada znany układ, zawierający regulator obrotów 2 silnika napędowego 1. Według wynalazku układ stabilizacji 8 podłączony równolegle do sieci 9 składa się z prostownika aktywnego 4, falownika 5 oraz superkondensatora 6 włączonego w obwódzie pośredniczącym prądu stałego. Prostownik aktywny 4 i falownik 5 jest realizowany w topologii mostkowej opartej o w pełni sterowane elementy półprzewodnikowe – tranzystory IGBT. Zastosowanie elementów półprzewodnikowych – tranzystorów IGBT związane jest z uzyskaniem optymalnego sposobu ładowania superkondensatora 6. Według wynalazku układ stabilizacji 8 jest podłączony bezpośrednio do sieci rozdzielczej (o zmiennym obciążeniu 7). Zastosowanie superkondensatora 6 w obwodzie pośredniczącym falownika 5 pozwala na uzyskanie wystarczającej energii dla kompensacji chwilowych zmian obciążenia. Zastosowanie superkondensatora 6 pozwala uzyskać wysoką dokładność stabilizacji napięcia i częstotliwości. Ładowanie superkondensatora 6 realizowane jest za pomocą obwodu z prostownikiem aktywnym 4 podłączonym do PMSG 3. Rozwiązanie według wynalazku pozwala na sterowanie falownika 5 w dwóch niezależnych kanałach sterowanie odsprężone) tak, aby jeden kanał odpowiadał za kompensację wzrostu obciążenia (kanał prądu czynnego – sygnały proporcjonalne do mocy czynnej), a drugi kanał za kompensację zmian poziomu napięcia (kanał prądu biernego – sygnały proporcjonalne do mocy biernej). Sterowanie połowo zorientowane falownika 5 jest realizowane w oparciu o model matematyczny PMSG 3 w układzie współrzędnych wirujących współbieżnie z przyjętym wektorem strumienia

skojarzonego wirnika. Według wynalazku za stabilizację napięcia i w stanach przejściowych stabilizację częstotliwości odpowiada układ stabilizacji 8. Za stabilizację częstotliwości w stanie ustalonym odpowiada tak jak w powszechnie stosowanych zespołach DG regulator prędkości obrotowej 3. Przykładem praktycznej realizacji rozwiązania może być elektroenergetyczna sieć okrętowa. Elektroenergetyczna sieć okrętowa jest odpowiednikiem sieci miękkiej. Moc odbiorników energii elektrycznej, którymi najczęściej są silniki asynchroniczne klatkowe, jest porównywalna z mocą zespołów prądotwórczych, którymi najczęściej składa się z silnika spalinowego (D) i prądnicy ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (G) (zespół prądotwórczy – DG). Charakterystyczną cechą tej sieci są częste zmiany obciążenia poprzez włączanie bezpośrednio silników klatkowych, które powodują zapady napięcia i przede wszystkim krótkotrwałe zmiany częstotliwości. W sieciach okrętowych obowiązują przepisy, które precyzują maksymalne odchylenie częstotliwości i napięcia od wartości nominalnych. Za utrzymanie częstotliwości i napięcia w zadanych przepisami granicach odpowiadają odpowiednio regulator obrotów D i regulator napięcia G. W sieci okrętowej z powszechnie stosowanymi zespołami prądotwórczymi DG zmiany parametrów (odchylenie częstotliwości i odchylenie napięcia) podczas zmian obciążenia ma znaczący wpływ na prace pozostałych (ważnych) odbiorów. Następuje przede wszystkim zmiana prędkości silników elektrycznych napędzających pompy, które w konsekwencji zmieniają parametry czynnika roboczego. Istotna też jest zmiana współczynnika mocy. Dzięki konstrukcji według wynalazku zespół prądotwórczy DG zostaje zastąpiony zespołem prądotwórczym D-PMSG.

Zastosowanie według wynalazku PMSG zamiast G pozwala na zwiększenie sprawności zespołu prądotwórczego i jego niezawodności, która wynika bezpośrednio z budowy PMSG. Sposób podłączenia według wynalazku układu stabilizacji 8 w porównaniu z powszechnie stosowanymi szeregowymi konwerterami napięcia w układach z PMSG zwiększa niezawodność i jakość napięcia w sieci 9. Układ stabilizacji według wynalazku pozwala ograniczyć odchylenia napięcia i częstotliwości w stanach przejściowych (przy dynamicznych zmianach obciążenia w sieci), co skutkuje poprawą jakości energii elektrycznej w sieci. Układ stabilizacji według wynalazku pozwala ograniczyć odchylenia napięcia w stanach statycznych, co skutkuje poprawą jakości energii elektrycznej w sieci.

Zastrzeżenie patentowe

1. Układ stabilizacji częstotliwości i napięcia (8) autonomicznych zespołów prądotwórczych składających się z silnika spalinowego (1) z regulatorem obrotów (2) i generatora synchronicznego z magnesami trwałymi (3), **znamienny tym**, że składa się z prostownika aktywnego (4) falownika (5) oraz superkondensatora (6), które są włączone równolegle z silnikiem spalinowym (1), regulatorem obrotów (2) i generatorem synchronicznym (3) do sieci rozdzielczej (9) o zmiennym obciążeniu (7), gdzie układ sterowania falownikiem (5) zawiera moduł stabilizacji częstotliwości i napięcia autonomicznych zespołów prądotwórczych, przy czym prostownik aktywny (4) i falownik (5) jest realizowany w topologii mostkowej opartej o w pełni sterowane elementy półprzewodnikowe w postaci tranzystorów IGBT.

Rysunek

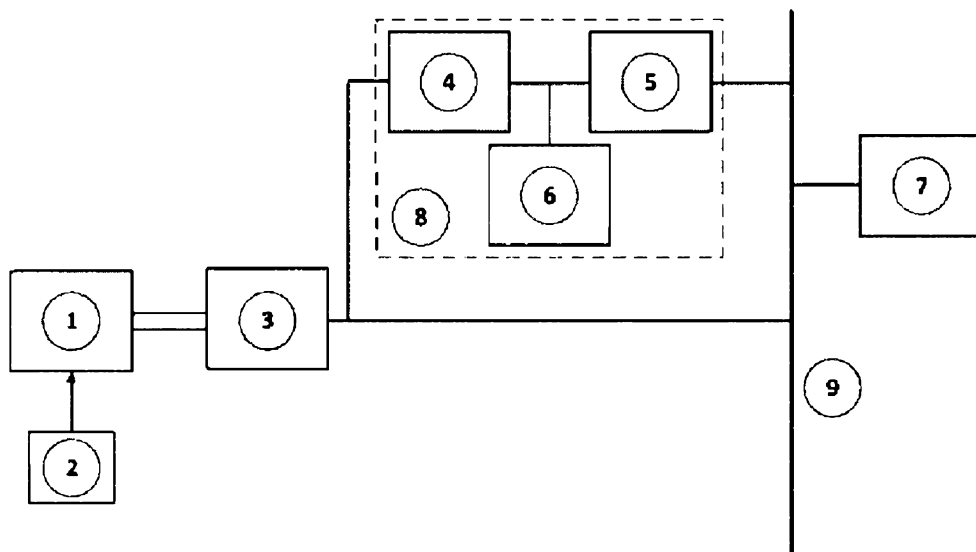


Fig. 1