УДК 621.548

РОБОТА СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВІТРОУСТАНОВКИ ЗІ ЗБУДЖЕННЯМ ВІД ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ НА МЕРЕЖУ

Отримано 7 жов. 2021; рекомендовано до публікації 21 бер. 2022
Доступно онлайн 31 трав. 2022

Ю. М. Перминов[1], Л. П. Волков[2], Є. А. Монахов[3]

Автор для кореспонденції: Юрій Перминов,
e-mail: renewable@ukr.net

[1] канд. техн. наук, старший наук. співроб., Інститут відновлюваної енергетики НАН України, м. Київ https://orcid.org/10000–0001–5604–8327

[2] старший наук. співроб., Інститут екологічного управління та збалансованого природокористування, м. Київ https://orcid.org/0000-0003-1988-9666

[3] канд. техн. наук, ст. викладач каф. електромеханіки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ https://orcid.org/0000-0001-8408-8051

У вітроенергетиці широке застосування отримали генератори різноманітних конструкцій: постійного струму, асинхронні, синхронні з електромагнітним збудженням. Останнім часом набуває розповсюдження застосування синхронних генераторів зі збудженням від постійних магнітів, зокрема генераторів мегаватної потужності.

Застосування постійних магнітів в системі збудження генераторів дає змогу виключити втрати на збудження та ковзкі контакти, спростити конструкцію, підвищити ККД та надійність генераторів.

Проте в таких генераторах, на відміну від синхронних з електромагнітним збудженням, відсутня можливість регулювання вихідних параметрів генератора за рахунок зміни його збудження. Тому стабілізація вихідних параметрів генераторів даної конструкції, особливо при їх роботі на мережу, постає вкрай актуальною задачею. Ця задача потребує вирішення питань регулювання параметрів генератора з використанням електронних схем (інверторів), з урахуванням безперервної зміни швидкості вітру, частоти обертання генератора та відповідної зміни його параметрів.

У статті продемонстровано параметри та умови, виконання яких є обов'язковим при паралельній роботі генератора та мережі, а також відзначено негативні наслідки помилкового фазування генератора та мережі.

У разі обертання ротора генератора вітроколесом, безперервно змінюється кут Θ між ЕРС генератора і напругою мережі, в процесі чого змінюється електромагнітна потужність та момент генератора. Якщо швидкість ротора вища, ніж синхронна швидкість, кут Θ постійно зростає й машина почергово переходить з режиму генератора у двигунний, і навпаки.

У двигунному режимі електромагнітний момент змінює свій знак та діє на ротор у напрямку його обертання, оскільки є двигунним. При куті Θ > π/2 генератор може випасти з синхронізму, тобто відбувається складний перехідний процес, який визначає вимоги до електронної схеми, увімкненої між генератором і мережею.

В статті наведено варіант зазначеної схеми, яка складається з декількох блоків, та проаналізовано їх взаємозв'язок. Тож можна зробити висновок про можливість стабілізації вихідних параметрів вітроустановок зі збудженням від постійних магнітів відповідно до вимог мережі.

Ключові слова: *вітроустановка, синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів, постійні магніти, електронна схема.*

OPERATION OF PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS GENERATOR APPLIED TO THE GRID CONNECTED WIND TURBINES

Received 7 Oct. 2021; accepted 21 March 2022.
Available online 31 May 2022

Y. Permynov[1], L. Volkov[2], E. Monakhov[3]

Author for correspondence Yuriy Permynov,
e-mail: renewable@ukr.net

[1] Ph.D, Senior Researcher, Institute of Renewable Energy of the NAS of Ukraine, Kyiv
https://orcid.org/0000-0001-5604-8327

[2]senior staff scientist of scientific-methodological support department, Institute for Environmental Management and Balanced Nature, Kyiv https://orcid.org/0000-0003-1988-9666

Different types of generators such as direct current, induction, synchronous with electromagnetic excitation have wide applica-

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

tion in wind power production. Recently, the application of permanent magnet synchronous generators, including megawatt power generators, became widespread.

The use of permanent magnets in the excitation system of generators makes it possible to eliminate excitation losses and sliding contacts, simplify the design, increase the efficiency and reliability of generators.

[3]Ph.D, Senior Lecturer at Electromechanics department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv https://orcid.org/0000-0001-8408-8051

However, in such generators, in contrast to synchronous with electromagnetic excitation, there is no possibility to adjust the output parameters of the generator by changing its excitation. Therefore, the stabilization of the output parameters of the permanent magnet generators, especially when they work on the network, is an extremely important task. This problem requires solving the problems of adjusting the parameters of the generator using electronic circuits (inverters), considering the continuous change of wind speed, speed of the generator and the corresponding change of its parameters.

This paper deals with the parameters and conditions that must be met in parallel operation of the generator and the network, as well as the negative consequences of erroneous phasing of the generator and the network.

In the case of rotation of the generator rotor by the wind wheel, the angle Θ between the EMF of the generator and the network voltage changes continuously, in the process of which the electromagnetic power and the torque of the generator change too. If the rotor speed is higher than the synchronous speed, the angle Θ increases continuously and the machine alternately switches from generator mode to motor mode, and vice versa.

In motor mode, the electromagnetic moment changes its sign and acts on the rotor in the direction of its rotation, being motor. At an angle Θ> π / 2, the generator can fall out of sync, ie there is a complex transition process that determines the requirements for the electronic circuit connected between the generator and the network.

The paper presents an option of this scheme, which consists of several blocks, and analyzes their relationship. As a result, it can conclude that it is possible to stabilize the output parameters of wind turbines with permanent magnet excitation in accordance with the requirements of the network.

Keywords: *wind turbine, permanent magnet synchronous generator, permanent magnets, electronic circuit*

Перелік використаних скорочень та позначень:

P_e – основна потужність генератора

m – кількість фаз

U – напруга мережі

X_d – індуктивний опір по поздовжній осі

X_q– індуктивний опір по поперечній осі

P_u– реактивна складова потужності

I_k– струм короткого замикання одного генератора

I_k'– струм короткого замикання генератора при неправильному ввімкненні

M_e– електромагнітний момент

E_o– *ЕРС* генератора

ω – кутова швидкість обертання

ЕРС – електрорушійна сила

ККД – коефіцієнт корисної дії

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція (англ. pulse-width modulation (PWM))

Вступ. Підвищити ефективність перетворення енергії вітру в електричну можливо за рахунок удосконалення конструкції наявних типів електрогенераторів, використання нових технологій та матеріалів або розробки нових конструктивних рішень електрогенераторів [1, 2, 3]. Застосування синхронних генераторів зі збудженням від постійних магнітів, зокрема мегаватної потужності, у складі вітроустановок на сьогодні є дуже поширеним [4]. Використання постійних магнітів у системі збудження генераторів дозволяє виключити витрати на збудження, усунути ковзкі контакти, одночасно даючи змогу спростити конструкцію, підвищити ККД та надійність машин [5, 6].

Проте в генераторах такої конструкції, на відміну від синхронних з електромагнітним збудженням, відсутня можливість регулювання вихідних параметрів шляхом зміни збудження [7]. Тому стабілізація вихідних параметрів генераторів зі збудженням від постійних магнітів, особливо у разі їх роботи на мережу, постає актуальним завданням, що потребує вирішення питань регулювання параметрів генератора за рахунок використання електронних схем (інверторів), з урахуванням безперервної зміни швидкості вітру, частоти обертання генераторів та відповідної зміни їхніх параметрів [8, 9].

Постановка задачі. Предметом цієї статті є оцінка можливості забезпечення роботи синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів на мережу із застосуванням електронної схеми між генератором та мережею.

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

У статті наведено параметри та умови, дотримання яких є обов'язковим при паралельній роботі генератора та мережі, розглянуто негативні наслідки при помилковому фазуванні генератора й мережі. У разі обертання ротора генератора вітроколеса безперервно міняється кут Θ між ЕРС генератора і напругою мережі, в процесі чого змінюється електромагнітна потужність та момент генератора. Якщо швидкість ротора вища, ніж синхронна швидкість, кут Θ безперервно зростає й машина почергово переходить з генераторного режиму в двигунний, і навпаки.

У режимі двигуна електромагнітний момент змінює знак та діє на ротор в напрямку його обертання, оскільки є рушійним. При куті $\Theta > \pi/2$ машина може випасти з синхронізму. У такий спосіб відбувається складний перехідний процес, який визначає вимоги до електронної схеми, увімкненої між генератором та мережею.

Завданням дослідження є розгляд варіанта такої електронної схеми, яка складається з декількох блоків, проведення аналізу кожного блока та визначення їх взаємозв'язку з метою з'ясування можливості стабілізації вихідних параметрів генераторів вітроустановок зі збудженням від постійних магнітів відповідно до вимог мережі. При цьому схема наводиться у спрощеному вигляді, без детального викладення роботи її окремих елементів, що зумовлює обмежену кількість ілюстративних матеріалів (схем).

Результати дослідження. З метою підвищення надійності електропостачання потужних промислових центрів живлення останніх забезпечується роботою декількох станцій, які працюють на спільну електромережу. Це має ряд переваг, зокрема:

- зменшується обсяг резервних потужностей на станціях на випадок аварійних ситуацій чи ремонтних робіт;
- виникає можливість більш раціонального розподілу навантаження між станціями і, як наслідок, підвищення економічних показників усієї енергосистеми.

При паралельній роботі синхронних генераторів на єдину спільну мережу вони мають працювати на тій самій частоті. При роботі вітроенергетичної установки (або будь-якого генератора) на мережу важливо підтримувати однакову частоту обертання з похибкою не більш ніж 0,2 %, згідно з державними стандартами. За рахунок синхронізувального моменту обертання, що виникає при паралельній роботі, відбувається точна синхронізація з мережею. При паралельній роботі синхронних генераторів можливі їх коливання або гойдання, які відповідають кутовому переміщенню ротора в деяких межах полюсної поділки. Одним із суттєвих питань паралельної роботи є операція підключення нового генератора до шин станції, на які раніше вже було увімкнено генератори, що живлять мережу. В момент увімкнення мають виконуватися такі умови:

3. Напруга генератора, який підключається, має дорівнювати напрузі мережі.
4. При змінному струмі є необхідною рівність частот систем, що з'єднуються.
5. Чергування фаз у нового генератора та мережі має бути однаковим.
6. Напруга генератора та мережі повинні бути у фазі.

Для виконання всіх перелічених умов використовують синхронізувальні пристрої.

При роботі з мережею, тобто з іншими синхронними машинами, зручно виражати потужності через величини, які характеризують вплив зовнішніх (по відношенню до обмотки статора) причин на режим її роботи. Такими величинами є: напруга мережі – U, ЕРС, яка індукується в обмотці статора – E_o, Θ – кут між векторами U та E_o, що визначається кутовим положенням ротора відносно результуючого обертового магнітного потоку статора. Тому потужність визначається як [10–13]: $P = f(E_0, U, \Theta)$.

При U = const $f = const$ (нескінченно потужна мережа) та $E_0 = const$ (постійне збудження); потужність P_e залежить лише від кута навантаження Θ – кутова характеристика машини (рис. 1).

Основна потужність генератора визначається виразом:

$$Pe = \frac{m \cdot E_0 \cdot U}{X_d} \cdot sin\ sin\ \theta \quad . \qquad (1)$$

У явнополюсних синхронних машинах існує додаткова складова реактивної потужності:

$$P_u = \frac{m \cdot U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cdot sin\ sin\ 2\theta \quad , \qquad (2)$$

яка не залежить від збудження машини.

У неявнополюсних машинах $X_d = X_q$, тому $P_u = 0$.

Якщо припустити, що до шини було приєднано чотири ідентичних генератори (кожен з яких має індуктивним опором *X)* та до них раптово підключається п'ятий такий самий генератор з помилковим фазуванням, то в цьому разі еквівалентний індуктивний опір чотирьох паралельно підключених генераторів буде дорівнювати *0,25·X*, а приєднуваного –

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

X. Тоді струм одного генератора при його раптовому короткому замиканні дорівнює $I_k = \frac{E_0}{X}$, а при зазначеному вище неправильному ввімкненні

$$I_k' = \frac{E_0+E_0}{X+0{,}25X} = 1{,}6 \cdot \frac{E_0}{X} = 1{,}6I_k \quad (3)$$

Зусилля у лобових частинах, розраховані на струм короткого замикання, зростуть в 1,62 ≈ 2,5 раза, що може призвести до пошкодження машини. У разі ж, коли до шини буде приєднано лише один генератор, то

$$I_k'' = \frac{2E_0}{2X} = \frac{E_0}{X} = I_k, \quad (4)$$

тобто у цьому разі трапився б різкий підйом струму, що дорівнює раптовому короткому замиканню самого генератора. А оскільки зусилля у лобових частинах мають бути розраховані на ці умови, то ймовірність пошкодження обмоток практично відсутня. На практиці використовується самосинхронізація генераторів: генератор приводиться в обертання з підсихронною швидкістю й сам втягується у синхронізм подібно до синхронного двигуна при асинхронному пуску. При цьому явнополюсний генератор краще втягується в синхронізм, оскільки має реактивний момент (2), окрім основного моменту (1). На рис. 1 показана кутова характеристика потужності синхронного генератора, при цьому видно, що максимальна активна потужність Pe синхронного генератора досягається при куті $\Theta = \pi/2$, а повна потужність *P* для неявнополюсного складається з двох компонентів P_e .та P_u .

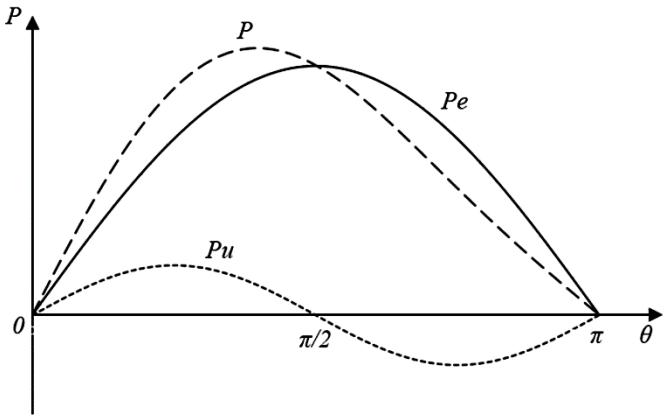

Рис. 1. Кутова характеристика потужності синхронного генератора

Fig. 1. Angular power characteristic of a synchronous generator

У разі обертання ротора генератора вітроколесом кут Θ безперервно змінюється (наприклад, при швидкості ротора вище за синхронну кут Θ постійно зростає) й машина почергово переходить з генераторного режиму в двигунний, і навпаки. При навантаженні генератора на його ротор діє гальмівний електромагнітний момент M_e, величина якого визначається електромагнітною потужністю P_e, та механічною кутовою швидкістю обертання ротора ω:

$$M_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{mE_oU}{\omega Xd} \cdot sin\ sin\ \Theta + \frac{m \cdot U^2}{2} \cdot \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d}\right) \cdot sin\ sin\ 2\theta \quad (5)$$

У режимі двигуна момент M_e змінює свій знак та діє на ротор у бік його обертання, оскільки є двигунним. Вочевидь, при роботі синхронного генератора з вітроколесом відбувається безперервний перехідний процес, змінюється кут Θ та електромагнітний момент. При куті $\Theta > \pi/2$ генератор може випасти з синхронізму, що впливає на мережу. В машинах з електромагнітним збудженням можливе регулювання параметрів генератора зміною струму збудження. У машинах зі збудженням від постійних магнітів така стабілізація неможлива, в зв'язку з чим використовується стабілізація вихідних параметрів генератора із застосуванням електронних схем. У такому разі генератору може бути притаманний ряд конструктивних особливостей, зокрема розширена полюсна дуга для збільшення корисного потоку, що призводить до відхилення форми вихідної ЕРС від синусоїди. Однак при роботі на випрямляч та інвертор головною метою є досягнення максимальної потужності.

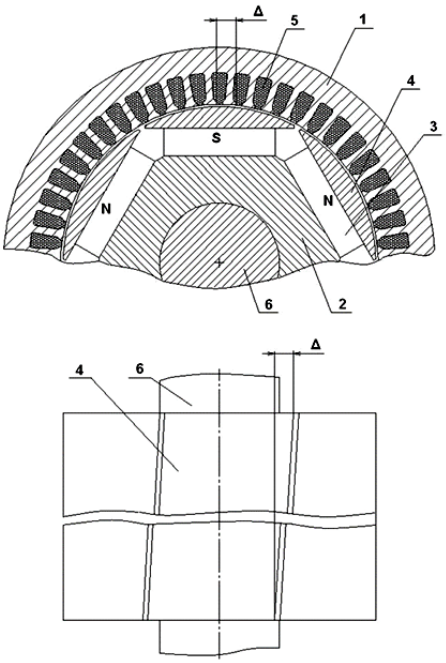

Рис. 2. Синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів на базі серійного асинхронного двигуна: 1 – пакет статора; 2 – ярмо ротора; 3 – магніт; 4 – металевий сегмент; 5 – обмотка; 6 – вал; Δ – крок

Fig. 2. Synchronous generator with permanent magnet excitation based on a serial asynchronous motor: 1 – stator package; 2 – rotor yoke; 3 – magnet; 4 – metal segment; 5 – winding; 6 – shaft; Δ – step

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

На рис. 2 показано реалізовану конструкцію генератора зі збудженням від постійних магнітів [14] для вітроустановки, в якій магніти займають максимальний об'єм, а полюсні башмаки полюсів протилежної полярності максимально наближені для зменшення магнітного опору робочого проміжку. При цьому потоки розсіювання між боковими поверхнями башмаків є незначними – через малу площу цих поверхонь. У такій конструкції [14, 15] не лише збільшується корисний потік, але й зменшуються реактивні моменти від зубцевих пульсацій по поздовжній та поперечній осях (які в свою чергу додатково зменшуються використанням полюсних башмаків зі скосом на одну зубцеву поділку). Особливістю машин зі збудженням від постійних магнітів є мала величина реактивних опорів по поздовжній і поперечній осях (X_d, X_q). Це пов'язано з великим магнітним опором на шляху потоку реакцій якоря, зумовленим низькою магнітною проникністю високоерцитивних магнітів, яка є близькою до аналогічного показника у повітря (магнітна проникність повітря $\mu_0 = 12{,}55 \cdot 10^{-7}$ Гн/м).

Зважаючи на перелічені причини, можна спростити векторну діаграму напруг синхронного генератора [16], а фазну напругу генератора можна визначати за формулою:

$$U_{\phi} = U_{R\phi} + \sqrt{E_{\phi}^2 - (U_{X\phi})^2}, \quad (6)$$

де $U_{R\phi}$ – падіння напруги на активному опорі тиску;

$U_{X\phi}$ – падіння напруги на індуктивному опорі фази.

Стабілізація вихідної напруги та інших зазначених параметрів, необхідних для роботи вітроустановки зі збудженням від постійних магнітів на мережу, можлива за умови використання схеми (рис. 3), що демонструє, в який спосіб нерегульований синхронний генератор може працювати на мережу [17]. Під час роботи вітроустановка може змінювати частоту та напругу, тому для роботи на мережу необхідно спочатку випрямити напругу, стабілізувати її та перетворити постійну напругу в змінну, яка буде синхронна і синфазна з частотою мережі та матиме синусоїдальну форму. Тоді мережа буде отримувати стабільну змінну напругу з частотою, еквівалентною частоті мережі, та коефіцієнтом потужності, що дорівнює 1.

Перетворення у постійний струм здійснюється трифазним керованим мостовим випрямлячем. Випрямлена напруга $U_{в}$ змінюється в залежності від швидкості вітру; для подальшого перетворення у змінний струм напругу необхідно зафіксувати на певному рівні. У керованому мостовому випрямлячі використовуються тиристори (відкриваються залежно від керувального імпульсу), що дозволяє регулювати середнє значення напруги на відміну від некерованих випрямлячів, побудованих на діодах. Випрямлена напруга характеризується значними пуль-

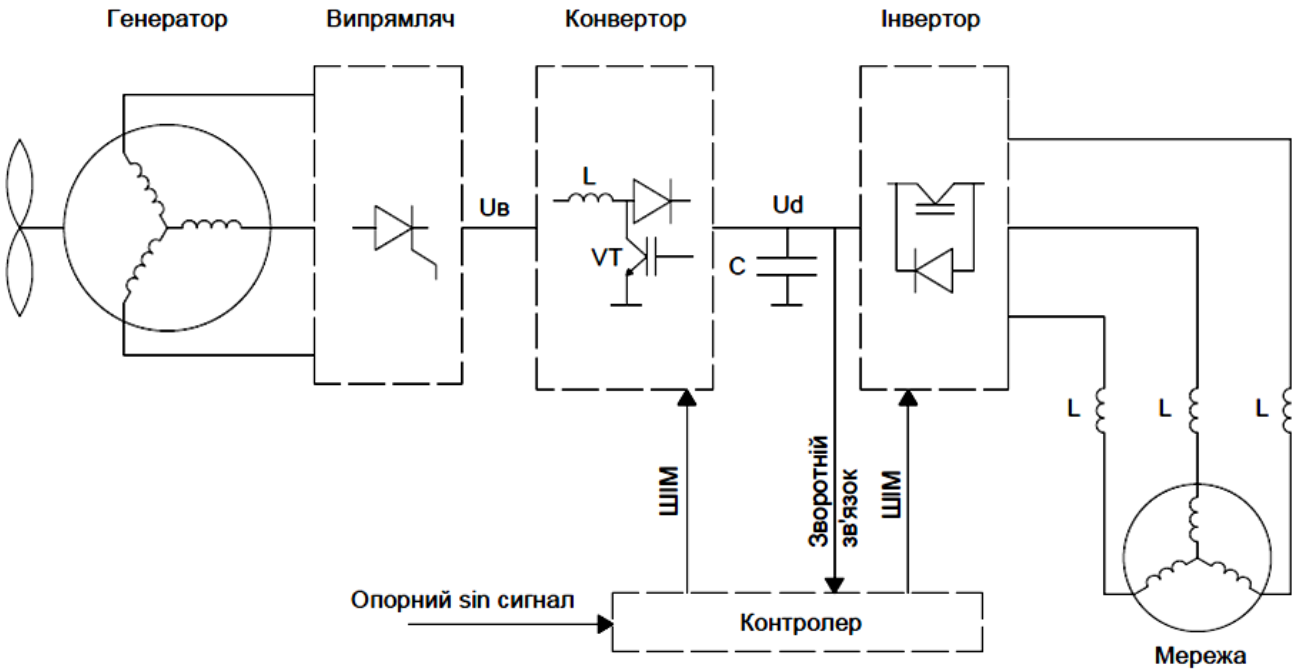

Рис. 3. Функціональна схема підключення до мережі синхронного генератора зі збудженням від постійних магнітів

Fig. 3. Functional network connection scheme of the permanent magnet synchronous generator

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

саціями, тому на вихід потрапляє через згладжувальний фільтр, який складається з послідовно з'єднаних котушок індуктивності та конденсатора. Напруга, що знімається з конденсатора, майже позбавлена пульсацій, її потрібно стабілізувати за допомогою зворотного зв'язку, що подається через контролер на вхід тиристорного перетворювача. Отже, вихідна напруга генератора може змінюватись, а випрямлена лишатиметься стабільною. Для подальшого перетворення у змінний струм її необхідно зафіксувати на певному рівні. З цією метою використовують підвищувальний конвертор (для частот нижче номінальної – 50 Гц) та керований випрямляч (для частот понад 50 Гц). Конвертор підтримує необхідний рівень вихідної напруги U_d шляхом генерування додаткової напруги. Керований випрямляч зберігає випрямлену напругу генератора незмінною, незважаючи на зростання ЕРС обертання генератора із підвищенням швидкості вітру.

Далі трифазний мостовий інвертор перетворює напругу постійного струму у трифазний змінний струм. Це аналогічний міст, проте у ньому використовуються вже не тиристори, а транзистори, оскільки при комутації постійного струму виникає потреба не лише відкривати, а й закривати вентилі через відсутність зворотної напруги. На одну діагональ мосту поступає постійний струм, а з другої – знімається знакозмінний струм: коли відкривається одна пара транзисторів, струм протікає у додатному напрямку, при відкритті другої пари – у від'ємному напрямку. Утворюється знакозмінний струм прямокутної форми, однак такий струм не задовольняє вимог мережі. Проте, піднявши частоту комутації транзисторних пар і при цьому змінюючи тривалість імпульсу за синусоїдальним законом (при постійній частоті їх комутації) – тобто використання ШІМ, а також LC-фільтру, – можна отримати достатньо чисту синусоїду. Тобто формування фазних струмів здійснюється методом широтно-імпульсної модуляції напруги U_d, що подається на фазні індуктивності L. При появі сигналу на відкриття транзистора струм в індуктивності зростає, а при паузі – спадає. Отже змінюючи співвідношення тривалості імпульсу та паузи за певним законом, можливо отримати бажану форму струму (у нашому випадку – синусоїду). Транзистори інвертора перемикаються таким чином, що зростання струму в індуктивностях відбувається під дією різниці напруг, що виникає від зустрічно діючих напруг – U_d (постійного струму) та мережі – U (лінійного змінного струму), причому U_d завжди перевищує U. Спадання струму в момент паузи викликається виключно зустрічною напругою мережі (U_d на цей час відключається). Синусоїда струму формується у протифазі до фазної напруги мережі, в зв'язку з чим передача енергії в мережу відбувається без вироблення реактивної енергії ($cos\varphi = 1$).

Фазування та ряд інших функцій (стабілізація, керування транзисторами інвертора, конвертора та ін.) здійснює контролер, який прив'язує вироблений інвертором синусоїдальний струм до синусоїди мережі та забезпечує потрібний фазовий зсув цього струму. Ці дії виконуються для трьох фаз. Розглянута схема не потребує датчика струму. Амплітуда струму задається максимальною тривалістю імпульсу напруги, згенерованої за допомогою ШІМ.

Діапазон швидкостей вітру, при яких генератор та схема здатні ефективно функціонувати, є обмеженим: зверху – зростанням втрат, напруги та частоти обертання вище припустимих значень; знизу – обмеженнями у роботі конвертора.

Використання конвертора розширює цей діапазон, даючи змогу підняти вихідну напругу постійного струму U_d до прийнятного рівня в діапазоні частот обертання нижче номінальної (відповідає частоті струму 50 Гц); при цьому збільшення напруги конвертора не перевищують прийнятного значення. При номінальній частоті струму та вище табілізація конвертором припиняється, при цьому випрямлена напруга продовжує зростати пропорційно збільшенню частоти обертання. У цьому разі починають діяти обмеження за припустимим рівнем напруги на діодах та транзисторах схеми, а також за суттєвим зростанням різниці напруг, що формує синусоїду струму. Застосування тиристорного перетворювача дозволяє в такій ситуації знизити середню випрямлену напругу. Застосування магнітів у системі збудження генераторів покращує питомі показники машини – співвідношення моменту та маси, моменту та габаритів, що робить конструкцію генератора більш компактною порівняно зі звичайною версією; дозволяє виключити витрати на збудження, які мають місце в машинах з електромагнітним збудженням, внаслідок чого, збільшивши ККД, спростивши конструкцію, виключивши щіткові контакти, і, зрештою, підвищити надійність роботи устаткування у складних кліматичних умовах. Зважаючи на перелічені переваги, генератори зі збудженням від постійних магнітів активно використовуються у вітроустановках мегаватних потужностей. При цьому стабілізація вихідних параметрів, що необхідна для роботи на мережу, здійснюється застосуванням сучасної елементної бази в одній з можливих схем, розглянутій у да-

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

ній статті.

ВИСНОВКИ

Наведено вимоги, дотримання яких необхідне для роботи генератора на мережу: напруга генератора, що підключається, має бути рівною напрузі мережі; при змінному струмі необхідна рівність частот систем, що з'єднуються; чергування фаз у нового генератора та мережі має бути однаковим; напруга генератора та мережі повинні бути у фазі.

Показано, що при необхідних постійних параметрах мережі: напруги $U = const$, частоти, $f = const$, (нескінченна мережа) та $E_0 = const$ (постійне збудження) – потужність генератора *P* залежить тільки від кута *Θ* (кутова характеристика) між векторами напруги мережі та ЕРС генератора E_0.

Наведено та описано загальні принципи стабілізації вихідних параметрів генератора зі збудженням від постійних магнітів, який працює на мережу.

Приведено та детально описано спільну роботу комплексу «інвертор – генератор вітроустановки» на прикладі запатентованого за участю автора статті генератора.

ПОСИЛАННЯ

1. Ю. М. Васьковський, Ю. А. Гайденко, М. А. Коваленко, *Математичне моделювання електричних машин з постійними магнітами*, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 193 с., 2017.
2. В. В. Чумак, М. А. Коваленко, О. І. Пономарьов, "Математическое моделирование генератора с комбинированным возбуждением автономной энергоустановки", *IEC Електромеханічні і енергозберігаючі системи,* № 3 (31), с. 53–60, 2015.
3. П. Ф. Васько, А. А. Брыль, П. П. Пекур, "Определение технических показателей эффективности использования ветроэлектрических агрегатов в Украине", *Энергетика и электрификация,* № 2, с. 48–51, 1995.
4. Windturbine database [Online]. Access: https://en.wind-turbine-models.com/turbines/26-tacke-tw-600
5. В. П. Коханевич, Ю. Н. Перминов, Н. А. Шихайлов, Н. В. Марченко, "Разработка и испытание генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок на базе серийных асинхронных двигателей", Международный научный журнал *"Альтернативная энергетика и экология "*, № 7, с. 48–55, 2012.
6. В. М. Головко, В. П. Коханевич, Ю. Н. Перминов, Н. А. Шихайлов, Н. В. Марченко, "Разработка и испытание генераторов с постоянными магнитами для ветроустановок на базе серийных асинхронных двигателей", *"Альтернативная энергетика и экология ",* № 07 (111), 2012.
7. Trung-Kien Hoang, M. Gabsi, L Vido, and F Gillon, "Comparison between a Double Excitation Synchronous Machine and a Permanent Magnet Synchronous Machine According to Various Constant Power Speed Ranges", *12th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Apr. 2017, Monaco, с. 2, 2017.
8. Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Ципленков, *Основи вітроенергетики: підручник,* М-во освіти і науки України, Державний ВНЗ «Національний гірничий університет», с. 91–96, 2015.
9. R. Nolan Clark, *Small Wind*, Academic press, pp. 39–67, 2014, https://doi.org/10.1016/C2010-0-67034-9
10. С. А. Кудря, Ю. Н. Перминов, В. Ф. Буденный, "Реактивные моменты синхронного ветрогенератора с возбуждением от постоянных магнитов", *Відновлювана енергетика,* № 4 (19), с. 34, 2008.
11. С. А. Кудря, Ю. Н. Перминов, В. Ф. Буденный, "Работа синхронного генератора с постоянными магнитами под нагрузкой" *Відновлювана енергетика*, № 3, с. 43, 2011.
12. Ю. Н. Перминов, Е. А. Монахов, Л. П. Волков, "Проектирование ветрогенераторов повышенной мощности (600-3600 кВт) с возбуждением от постоянных магнитов", *Відновлювана енергетика,* № 1, с. 42–51, 2020. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).42-51
13. Ю. Н. Перминов, Е. А. Монахов, Л. П. Волков., "Особенности проектирования ветрогенераторов повышенной мощности с возбуждением от постоянных магнитов", *Відновлювана енергетика*, № 2, с. 54–62, 2020. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).54-62
14. Ю. Н. Перминов, Е. А. Монахов, "Сравнение вариантов конструкций синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов для ветроустановок", *Відновлювальна енергетика*, № 2, с. 54–60, 2019. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60
15. Ю. Н. Перминов, В. П. Коханевич, Н. А. Шихайлов, *Патент на винахід* №38530. Україна. МПК H02K 21/00. Вітрогенератор із зубцевим статором. № u200809958. опубл. 12.01.2009, Бюл. № 1, 2009.
16. Н. М. Мхитарян, С. А. Кудря, Ю. Н. Перминов, "Проектирование синхронных генераторов для ветроустановок малой мощности", *Відновлювана енергетика*, № 2, с. 40, 2006.
17. Daniel W. Hart, *Power electronics*, The McGraw-Hill Companies, p. 382, 2011.

REFERENCES

1. Yu. Vaskovsky, Yu. Haidenko, and M. Kovalenko, *Mathematical modeling of electric machines with permanent magnets,* Kyiv, KPI National Technical University (in

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829

Ukrainian), 2017.

2. V. Chumak, M. Kovalenko, and O. Ponomarev, “Mathematical modeling of a generator with combined excitation for autonomous power plant ” (in Russian), *IES Electromechanical and energy saving systems*, No 3, pp. 53–60, 2015.
3. P. F. Vasko, A. A. Bryl, and P. P. Pekur, “ Determination of technical indicators of efficiency of use of wind power units in Ukraine” (in Russian), *Journal of Energy and Electrification,* No. 2, pp. 48–51, 1995.
4. Windturbine database [Online] Access: https://en.wind-turbine-models.com/turbines/26-tacke-tw-600
5. V. Kokhanevich, Yu. Perminov, N. Shikhaylov, and N. Marchenko, “Development and testing of permanent magnets generators for wind turbines based on serial asynchronous motors”, (in Russian), *Int. Sci. J. of Alternative Energy and Ecology (ISJAEE)*, No. 7, pp. 48–55, 2012.
6. V. Golovko, V. Kohanevich, Yu. Perminov, N. Shihaylov, and N. Marchenko, “Developing and testing permanent magnets generators for wind turbines ” (in Russian), *Int. Sci. J. of Alternative Energy and Ecology (ISJAEE),* No. 07 (111), 2012.
7. Trung-Kien Hoang, M. Gabsi, L. Vido, and F. Gillon, “Comparison between a Double Excitation Synchronous Machine and a Permanent Magnet Synchronous Machine According to Various Constant Power Speed Ranges”, in Proc. *12th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, Apr 2017, Monaco, p. 2, 2017.
8. G. Pivnyak, F. Shkrabets, N. Neuberger, and D. Tsyplenkov, *Fundamentals of wind energy: a textbook*, Ministry for Education and Science of Ukraine, State University "National Mining University", pp. 191–196, (in Ukrainian) 2015.
9. R. Nolan Clark, *Small Wind*, Academic press, pp. 39–67, 2014, https://doi.org/10.1016/C2010-0-67034-9
10. S. Kudrya, Yu. Perminov, and V. Budenny, “Reactive moments of a synchronous wind generator excited by permanent magnets” (in Russian), *Renewable Energy*, № 4 (19), p. 34, 2008.
11. S. Kudrya, Yu. Perminov, and V. Budenny, “Operation of a synchronous generator with permanent magnets under load” (in Russian), *Renewable energy*, № 3, p. 43, 2011.
12. Yu. Perminov, E. Monakhov, and L. Volkov, “Design of high-power wind generators (600–3600 kW) with excitation from permanent magnets”, (in Russian), *Renewable Energy*, № 1, p. 42–51, 2020. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.1(60).42-51
13. Yu. Perminov, E. Monakhov, and L. Volkov, “Features of designing high-power wind turbines with excitation from permanent magnets”, (in Russian), *Renewable Energy*, № 2, p. 54–62, 2020. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2020.2(61).54-62
14. Yu. Perminov, and E. Monakhov, “Comparison of design options for synchronous generators with excitation from permanent magnets for wind turbines”, (in Russian) *Renewable Energy*, № 2, p. 54–60, 2019. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2019.2(57).54-60
15. Yu. Perminov, V. Kokhanevich, and N. Shikhailov, *Patent for invention* №38530, Ukraine, IPC H02K 21/00, “Wind generator with a toothed stator”, № u200809958, publ. 12.01.2009, Bull. № 1, 2009.
16. N. Mkhitaryan, S. Kudrya, and Yu. Perminov, “Design of synchronous generators for low-power wind turbines”, (in Russian), *Renewable Energy*, № 2, p. 40, 2006.
17. Daniel W. Hart, *Power electronics*, The McGraw-Hill Companies, p. 382, 2011.

© М. П. Кузнєцов, О. В. Лисенко, О. А. Мельник https://doi.org/10.36296/1819-8058.2022.1(68)829