Шмена Є.П.

Одеська національна академія харчових технологій

ВІТРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЯ З БІРОТАТИВНИМ СИНХРОННИМ ГЕНЕРАТОРОМ

У статті наведені приклади класичного рішення для потужних вітроелектроустановок за такими схемами: асинхронний генератор із короткозамкнутим ротором; асинхронний генератор із фазним ротором; асинхронізований синхронний генератор подвійного живлення; синхронний генератор із збудженням від постійних магнітів або електромагнітним збудженням.

У статті також розглянуто питання принципу дії вітроелектростанції з біротативним генератором відповідно до авторського свідоцтва на корисну модель України № 94321. У такого генератора статор і ротор обертаються в підшипниках, ротор обертається енергією вітру, а статор – допоміжною системою «генератор – двигун». Напрямок обертання залежно від енергії вітру: у разі зменшення енергії вітру статор обертається системою «генератор – двигун» проти напрямку обертання статора, у разі збільшення енергії вітру статор обертається за напрямком обертання ротора. Швидкість обертання статора виміряно спеціальними датчиками частоти для підтримання частоти струму незалежно від швидкості вітру. Проаналізовані різні системи управління біротативною електричною машиною. Наведена схема вітроелектростата з біротативним генератором.

Розглянуто використання біротативної машини для вентиляторів головного провітрювання шахт, компресорів, вуглесосів; електропривід підйомної установки з біротативним двигуном.

У статті наведено для біротативного генератора графіки частоти обертання ротора залежно від моменту навантаження. Також наведено схему розподілу потужності біротативного генератора між двигуном і генератором постійного струму.

Наведена електрична схема системи «генератор – двигун» із паралельною передачею потужності з датчиками контролю частоти струму біротативного генератора, за даними яких здійснюється управління двигуном і генератором постійного струму для підтримання частоти струму 50 герців незалежно від сили.

Ключові слова: вітроелектростанція, біротативний генератор, енергетична діаграма, система управління, механічні характеристики.

Постановка проблеми. Класичне рішення для потужних вітроелектроустановок [1, с. 27] (до 7 МВт) таке: первинний перетворювач енергії вітру на механічну енергію (вітряк) – перетворювач параметрів механічної енергії (мультиплікатор) – перетворювач механічної енергії на електричну (генератор).

Існує декілька схем вітрових електростанцій:

1. Асинхронний генератор з короткозамкнутим ротором (рис. 1).

Основними недоліками даного технічного рішення є: відносно низький ККД; фіксована робоча частота обертання вітряка, що є причиною недовикористання його енергетичних можливостей, а наявність мультиплікатора знижує надійність і підвищує вартість установки.

2. Асинхронний генератор із фазним ротором (рис. 2).

На збудження за значного розузгодження частот витрачається відчутна частка електроенергії, що виробляється. Наявність ковзаючих контактів

і мультиплікатора також знижує надійність установки порівняно з попередніми.

3. Асинхронізований синхронний генератор (машини подвійного живлення) (рис. 3).

4. Синхронний генератор зі збудженням від постійних магнітів або електромагнітним збудженням (рис. 4).

Наведені схеми роботи повітряних електростанцій мають складну конструкцію, що потребує значної кількості складних елементів.

Є приклади [2, с. 125–129] використання біротативної синхронної машини в режимі двигуна в гірничій промисловості для регульованого електропривода вентиляторів головного провітрювання шахт, компресорів, вуглесосів, а також шахтних підйомних установок.

У роботі [3, с. 29–32] розглянута система управління швидкістю вентилятора за системою «генератор – двигун» (далі – Г-Д) з біротативним синхронним двигуном (рис. 5). У такій системі регулювання швидкості вентилятора здійсню-

Рис. 1. Асинхронний генератор із короткозамкненим ротором: 1 – мультиплікатор; 2 – асинхронний генератор; 3 – блок управління; 4 – трансформатор

Рис. 2. Асинхронний генератор з фазним ротором: 1 – мультиплікатор; 2 – асинхронний генератор; 3 – блок управління; 4 – трансформатор; 5 – блок збудження

Рис. 3. Асинхронізований синхронний генератор: 1 – мультиплікатор; 2 – асинхронний генератор; 3 – блок управління; 4 – трансформатор; 5 – перетворювач частоти

Рис. 4. Синхронний генератор із збудженням від постійних магнітів: 1 – мультиплікатор; 2 – синхронний генератор; 3 – перетворювач частоти; 4 – трансформатор; 5 – фільтр

Рис. 5. Біротативний електропривід: 1 – допоміжний двигун; 2 – редуктор; 3 – біротативний двигун; 4 – статор; 5 – ротор; 6 – робоча машина

Рис. 6. Електропривід робочої машини з біротативним двигуном

ється регулюванням струму збудження машин постійного струму реостатами $R_{вг}$ і $R_{вд}$.

У роботі [4, с. 46] розглянуто електропривід (рис. 6), що складається із синхронного біротативного двигуна 3, який приводить у дію робочу машину 6 через редуктор 2, до якого приєднано машину постійного струму 1, що може працювати в режимі двигуна або генератора. Якірне коло цієї машини постійного струму з'єднано з якорем другої машини постійного струму, що також може працювати в режимі генератора або двигуна

залежно від напрямку регулювання швидкості ротора.

У роботі [5, с. 1–4] розглянуто автоматизований електропривід (рис. 7), що складається із синхронного біротативного двигуна 1, який приводить у дію робочу машину 2 через редуктор 3, до якого приєднано машину постійного струму 4, що може працювати в режимі двигуна або генератора. Якірне коло цієї машини постійного струму з'єднано з якорем другої машини постійного струму 7, що також може працювати в режимі

Рис. 7. Біротативний електропривод:
1 – допоміжний двигун; 2 – редуктор;
3 – біротативний двигун; 4 – статор; 5 – ротор;
6 – робоча машина

Рис. 8. Електропривід підйомної установки з біротативним двигуном

Рис. 9. Розподіл потужностей

генератора або двигуна залежно від напрямку регулювання швидкості ротора.

У разі відсутності збудження 5 машини 4 статор обертається із синхронною частотою і ротор нерухомий. У разі поступового збільшення регулятором 6 струму збудження 5 ротор поступово регулює струм збудження 9 двигуна 7.

У роботі [6, с. 49–55] розглянуто електропривід підйомної установки 1 з редуктором 2 і біротативним двигуном 3 (рис. 8). У схемі позначено реостати: $R_{зд}$ – у колі збудження двигуна постійного струму Д, $R_{БГ}$ – у колі збудження синхронного біротативного генератора, $R_{зг}$ – у колі збудження генератора постійного струму Г.

Канатоведучий шків 1 підйомної машини з'єднаний через редуктор 2 з валом якоря двигуна постійного струму М, а також з індуктором біротативного синхронного двигуна 3. Статор приєднаний до трифазної мережі через контактні кільця. До вала статора приєднано генератор постійного струму Г. Кола якоря двигуна Д і якоря генератора Г з'єднані послідовно.

У такій системі має місце паралельна передача потужностей системою постійного струму Г-Д. Додатковий обертаючий момент буде передаватися паралельним каналом через загальний вал ротора біротативного двигуна БД та двигуна постійного струму Д, який вибирають приблизно рівним половинній потужності від потужності біротативного двигуна.

Щоб уникнути його перевантажень, пусковий момент установки не повинен перевищувати 1,4 номінального (наприклад, у багатоканатні підйомні установки, вентилятори). Таку систему електроприводу зазвичай застосовують для агрегатів, де пусковий момент не перевищує значення 2,8–3,0, що характерно для машин постійного струму.

Номінальним приймають такий режим біротативного двигуна, коли швидкість обертання його ротора зменшується до 0,5 від синхронної.

Уповільнення електроприводу здійснюється поступовим зменшенням струму в обмотці збудження генератора. Для реверсування необхідно ротор зупинити, а потім розігнати в зворотну сторону. З огляду на момент інерції доцільно для скорочення часу застосовувати електродинамічне гальмування.

Встановлена потужність електричних машин в описаній системі електроприводу (рис. 9), що складається з потужності біротативного двигуна P_c , потужності двигуна постійного струму $P_d = 0,5P_c$, потужності генератора постійного струму $P_g = 0,5P_c$, тобто дорівнює $3P_c$, що на одну електричну машину потужністю P_c менше порівняно із дводвигуновим електродвигуном за звичайною системою Г-Д.

Графіки (рис. 10) представляють механічні характеристики електропривода.

Крива 1 на механічних характеристиках електропривода ілюструє перерозподіл навантаження між синхронним біротативним двигуном і допоміжним двигуном Д. Похилі паралельні прямі 3 представляють механічні характеристики системи Г-Д за різних напруг генератора Г ($U_1 < U_2 < U_3$). Момент навантаження M_c прийнятий постійним і відображений вертикальною лінією 2. Похила

пряма 4 являє собою спільну механічну характеристику біротативного двигуна і двигуна Д. Для її побудови через точку А проводять горизонтальну пряму до перетину з лінією моменту навантаження в точці В. Потім через точки А і В проводять сумісну механічну характеристику.

У роботах [7, с. 49–55; 8, с. 32–34] розглянуто конструктивні особливості біротативних генераторів асинхронних і синхронних.

Постановка завдання. Пропонується значно простіша конструкція вітроелектростанції з біротативним синхронним генератором [5, с. 1–4], тобто із синхронним генератором, у якого статор і ротор обертаються в підшипниках.

Біротативна машина (рис. 11) має статор 4, що обертається в підшипниках 1. Трифазна напруга джерела живлення до обмотки статора приєднується через три контактні кільця за допомогою щіток 3. Напруга струму збудження приєднується до обмотки ротора через два контактні кільця за допомогою щіток 5. Вал ротора 6 обертається в підшипниках 2.

Використання біротативного синхронного генератора дає можливість запропонувати вітроелектростанцію, що відрізняється від описаних вище.

Виклад основного матеріалу дослідження. Роботоздатність вітроелектростанції була перевірена на дослідній моделі з використанням біротативного синхронного генератора, виготовленого на базі генератора МСА-72-4 потужністю 15 кВт, з номінальним струмом 22 А лінійною напругою 380 В за частоти обертання 1 500 об/хв.

Особливістю вітроелектростанції є використання біротативного синхронного генератора (рис. 12), який має статор 1 і ротор 2. Вал 3 ротора 2, що обертається в підшипниках 4, з'єднано з вітроколесом 5. Вал 16 статора 1, що обертається в підшипниках 17, з'єднано з валом двигуна постійного струму 13 [5, с. 1–4].

Якір двигуна 13 з'єднано з якорем генератора 9. Вал генератора 9 з'єднано з вихідним валом 8 редуктора 7. Трифазна напруга, що виробляється біротативним синхронним генератором, знімається через три контактні кільця за допомогою щіток 15. Обмотка збудження біротативного синхронного генератора приєднана до регулятора струму збудження 11 через два контактні кільця за допомогою щіток 6. Величина струму збудження синхронного біротативного генератора визначається датчиком 12 частоти і напруги синхронного біротативного генератора. Регулятори 10 і 14 регулюють струми збудження генератора 9 і двигуна 13.

Рис. 10. Механічні характеристики

Рис. 11. Біротативна машина

Рис. 12. Схема вітроелектростанції

Відомо, що частота струму генератора прямо пропорційна частоті обертання магнітного поля n_0 , що створюється обмоткою збудження ротора:

$$n_0 = \frac{60f}{p}, \quad (1)$$

де f – частота струму; p – число пар полюсів генератора.

Якщо частота обертання ротора $n_{\text{рот}}$ така, що відповідає частоті струму $f = 50$ Гц, то статор повинен бути нерухомим, тобто його частота обертання $n_{\text{ст}} = 0$. У разі зменшення швидкості вітру зменшується частота обертання ротора генератора $n_{\text{рот}}$, що відповідно зменшує частоту обертання магнітного поля статора n_0 , через що зменшується частота струму мережі f .

Тому статор треба обертати в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, з такою частотою $n_{\text{ст}}$, щоб

$$n_{\text{рот}} + n_{\text{ст}} = n_0 = \text{const.} \quad (2)$$

У разі збільшення швидкості вітру збільшується частота обертання ротора генератора $n_{\text{рот}}$, що приведе до збільшення частоти струму, тому статор треба обертати в напрямку, погодженому з напрямком обертання ротора, з такою частотою $n_{\text{ст}}$, щоб $n_{\text{рот}} - n_{\text{ст}} = n_0 = \text{const.}$

У разі збільшення швидкості вітру двигун постійного струму 13 обертає статор 1 погоджено з напрямком обертання ротора 2 біротативного синхронного генератора, а в разі зменшення – навпаки. Регулювання швидкості обертання двигуна постійного струму здійснюється регулюванням струмів в обмотках збудження генератора 9 і двигуна 13 регуляторами 10 і 14. Напрямок регулювання частоти обертання визначається датчиком частоти і напруги 12, а величина напруги – регулюванням струму збудження біротативного синхронного генератора регулятором 11.

Експериментальні дослідження проводились на установці, аналогічній наведеній на рис. 13.

Висновки. Роботоздатність вітроелектростанції була перевірена на дослідній моделі з використанням біротативного синхронного генератора потужністю 15 кВт. Обертання ротора генератора здійснювалося двигуном постійного струму, що імітував різну швидкість вітру.

Із графіків видно (рис. 13), що в разі збільшення частоти обертання ротора $n_{\text{рот}}$, тобто збіль-

Рис. 13. Експериментальні дослідження

шення швидкості вітру, частота обертання статора $n_{\text{ст}}$ зменшується.

Оскільки біротативний синхронний генератор чотириполосний, то частота обертання його магнітного поля, згідно з формулою (1), дорівнює $n_0 = 1500$ об/хв. За частоти обертання ротора 2 $n_{\text{рот}} = 750$ об/хв частота обертання статора також $n_{\text{ст}} = 750$ об/хв, що відповідає формулі (2).

У разі зменшення швидкості вітру частота обертання ротора 2 $n_{\text{рот}}$ зменшується, а частота обертання статора 1 $n_{\text{ст}}$ відповідно збільшується. На графіках також показано, що зі збільшенням частоти обертання ротора $n_{\text{рот}}$ потужність біротативного $P_{\text{ст}}$ синхронного генератора і його струм $I_{\text{а}}$ також збільшуються, а струм якоря $I_{\text{д}}$ генератора постійного струму, від якого живиться двигун постійного струму, що регулює частоту обертання статора, відповідно зменшується. Регулювання частоти і напруги визначається датчиками 11, 12.

Отже, наведенні експериментальні дослідження показали роботоздатність розглянутої схеми вітроелектростанції.

Список літератури:

1. Беляков П.Ю., Панов Р.М. Анализ эффективности современных цепей преобразования энергии в ветроэлектрических установках большой мощности альтернативная энергетика. 2011. № 4. С. 27–34.
2. Берловский В.М., Штепа Е.П., Богопольский Б.Х. Регулируемый синхронный биротативный электропривод. Горный журнал. 1967. № 1. С. 125–129.
3. Берловский В.М., Штепа Е.П. Симстама Г-Д с параллельной передачей мощности для шахтных подъемных установок. Электротехника. 1965. № 6. С. 29–32.
4. Штепа Е.П. Автоматизованний електропривід із синхронним біротативним двигуном. Інформаційні технології та автоматизація : збірник доповідей учасників VI Всеукраїнської науково-практичної конференції. 2013. С. 46.
5. Штепа Є.П. Вітроелектростанція: Патент № 94321 Україна : МПК F03D 1/02/ заявник ; патентовласник Одеська нац. акад. харчових технологій. U201405454; заявлено 22.05.14. С. 1–4.

6. Бояр-Сазонович С.П., Штепа Е.П. Биротативные электрические машины переменного тока в генераторном и двигательном режимах. *Техническая электродинамика*. 1993. № 6. С. 49–55.
7. Бояр-Сазонович С.П. Биротативный асинхронный генератор. *Электроэнергетика и электрификация*. 1982. № 2. С. 51–52.
8. Бояр-Сазонович С.П. Биротативный синхронный генератор. *Электроэнергетика и электрификация*. 1987. № 2/13. С. 32–34.

Shtepa E.P. WIND POWER PLANT WITH BIROTATIVE SYNCHRONOUS GENERATOR

The article gives examples of the classic solution for the powerful wind turbines according to the following schemes: asynchronous generator with short-circuited rotor; asynchronous generator with phase rotor; asynchronous synchronous dual power generator; synchronous generator with excitation from permanent magnets or electromagnetic excitation.

The article also considers the principle of operation of a wind power plant with a birotative generator in accordance with the Austrian certificate for a utility model of Ukraine № 94321. In such a generator, the stator and rotor rotate in bearings, where the rotor rotates with wind energy, and the stator with an auxiliary system generator-engine (system G-D). Direction of rotation depending on wind energy: when the wind energy decreases the stator system GD rotates against the direction of rotation of the stator and vice versa: when the wind energy increases the stator rotates in the direction of rotor rotation.

Various control systems of birotative electric machine are analyzed. The scheme of wind power with birotative generator is given.

The use of a birotative machine for fans of the main ventilation of mines, compressors, coal pumps is considered; electric lifting machine with birotative motor.

The article presents for the birotative generator a graph of the dependence of the rotor speed depending on the load moment. Also the scheme of distribution of power of the birotative generator between the engine and the generator of a direct current is resulted.

The electric scheme of system GD with parallel transfer of power with sensors of control of frequency of current of the birotative generator according to which control of the motor and the generator of a direct current for maintenance of current frequency of 50 Hz irrespective of force is resulted is resulted.

Key words: *wind power plant, birotative generator; energy diagram, control system, mechanical characteristics.*