

К.А. Kuchynskyi

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

The thermostressed state of isolation of the winding of the stator of the turbogenerator at various alternatives of its fastening in the end face of the core

Thermomechanical characteristics of isolation of the rod of a winding of the stator of the powerful turbogenerator taking into account various efficiency factors are numerically investigated. Regularity of distribution of thermostresses are defined, insignificant decrease in their values in a grooving part and effect of «migration» of the maximum magnitudes in space in the presence of a free section of a winding in a end face of the core is established. The gained results explain the facts of local easing of pressing the packages of the stator which has been had directly after free sections or after stuck together packages on some distance from an end face that aggravates process of degradation of the core of the stator of the generator in operating modes. References 8, figures 3.

Key words: the turbogenerator, stator winding, isolation, thermomechanical movings and stresses, finite element method.

Надійшла 25.01.2016

Received 25.01.2016

УДК 621.313.03

КАСКАДНИЙ ЕЛЕКТРОГЕНЕРАТОР ДЛЯ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ

А.І. Антоненко, канд. техн. наук

Київський національний університет технологій та дизайну,
вул. Немировича-Данченка, 2, Київ-11, 01011, Україна
e-mail: antonenko39@gmail.com

Розглянуто можливість створення безредукторного автономного генератора змінного струму промислової частоти для вітроенергетичної установки з малою (близько 300 об/хв) частотою обертання та отримання співвідношень між його параметрами. Бібл. 4, рисунок.

Ключові слова: електрична машина, фазний ротор, каскадне з'єднання, обмотка.

Враховуючи, що на сьогодні запаси енергоресурсів обмежені, все більшого значення набуває використання відновлюваних екологічно чистих джерел енергії, до яких належать вітро- та гідроенергетика. Деякі країни особливо інтенсивно розвивають вітроенергетику, зокрема, на 2011 рік у Данії за допомогою вітрових енергоустановок (ВЕУ) виробляється 28 % всієї електроенергії країни, Китай наростив встановлені потужності вітрових електростанцій за 2005–2011 рр. з 1260 до 62733 МВт [2].

Для вітро- та гідросилових установок характерні низькі частоти обертання. Вітрові енергоустановки можна поділити на дві категорії: промислові та побутові (для приватного використання). Побутові ВЕУ мають набагато меншу потужність, ніж промислові, й часто виконуються зі збудженням постійними магнітами. При цьому напруга генератора і за величиною, і за частотою залежить від частоти обертання і потребує перетворювача частоти на повну потужність, що знижує коефіцієнт корисної дії ВЕУ. Метою роботи є дослідження можливості виконання генератора змінного струму зі стабільною частотою при регулюванні його електромагнітного збудження за величиною і частотою при зміні частоти обертання.

Об'єкти та методи дослідження. Щоб отримати напругу промислової частоти, генератор повинен мати при низькій частоті обертання велике число пар полюсів. Це викликає певні труднощі забезпечення ефективного використання об'єму, відведеного для генератора. Цих труднощів можна уникнути завдяки використанню каскадного з'єднання електричних машин з фазним ротором [1]. Для аналізу електромагнітних процесів в усталеному режимі роботи скористаємось методом кругових обертальних полів та класичними методами зведення параметрів обмоток до однієї частоти, числа фаз та числа витків у схемі заміщення фази.

Постановка завдання. Для живлення обмотки збудження можна брати енергію з виходу генератора, перетворюючи її параметри (величину напруги та її частоту) до необхідного значення за допомогою перетворювача частоти з ланкою постійного струму. Такі перетворювачі можуть бути створені на базі потужних транзисторних регуляторів постійного струму з високочастотною імпульсною модуляцією [3]. Одним із завдань цієї роботи є отримання співвідношень для розрахунку необхідних параметрів електромагнітної енергії збудження каскадного генератора залежно від частоти обертання в усталеному режимі.

Результати та їх обговорення. Каскад двох асинхронних машин з фазним ротором у загальному випадку має одну машину з числом пар полюсів p_1 , на статорі якої розміщена обмотка з числом фаз m_1 та ефективним числом витків у фазі $W_1 k_{обм1}$. На роторі цієї машини розміщена обмотка з числом фаз m_2 та ефективним числом витків у фазі $W_2 k_{обм2}$. На роторі другої машини з числом пар полюсів p_2 розміщена обмотка з числом фаз $m_3 = m_2$ та ефективним числом витків у фазі $W_3 k_{обм3}$. Обмотки 2 і 3 роторів з'єднані так, що при обтіканні їх багатофазною системою струму, вони збуджують магнітні поля, які обертаються відносно ротора в протилежні сторони. У загальному випадку до затискачів обмоток статора може бути прикладена напруга різної величини (U_1) і (U_4) та частоти (f_1) і (f_4) (див. рисунок).

При роботі каскаду асинхронних машин з фазним ротором напруга U_1 частотою f_1 подається на обмотку статора 1. Струми I_1 утворюють в зазорі першої машини обертальне магнітне поле. Прийемо напрямок його обертання від'ємним. Тоді обертальне магнітне поле в зазорі другої машини буде обертатись у позитивному напрямку. Якщо обертати ротор у позитивному напрямку з частотою n , то для отримання на виході генератора незмінної частоти обертальне магнітне поле першої машини, що рухається в напрямку, протилежному напрямку обертання ротора, має зменшити свою частоту обертання:

$$-n_{c1} = f_1 / p_1, \quad (1)$$

яка буде від'ємною, тобто $f_1 < 0$ у цьому режимі. Зміна знака частоти означає зміну порядку чергування фаз на зворотний. Стосовно ротора частота обертання n_{c2} магнітного поля з числом пар полюсів p_1 визначається частотою f_2 струму обмотки 2:

$$-n_{c2} = f_2 / p_1. \quad (2)$$

Стосовно статора це поле, обертаючись разом з ротором з частотою n , має обертатись з такою ж частотою, як і поле обмотки 1:

$$-n_{c1} = -n_{c2} + n; \quad f_1 / p_1 = f_2 / p_1 + n. \quad (3)$$

Оскільки при $p_1 n < |f_1|$ і $f_1 < 0$ та $n > 0$, то $f_2 < 0$. Це означає, що система струмів в обмотці 2 створює магнітне поле з числом пар полюсів p_1 , яке обертається стосовно ротора проти напрямку обертання ротора. Ця ж система струмів протікає по обмотці 3 ротора 2 з протилежним порядком чергування фаз, тобто $f_3 = -f_2 = p_1 n - f_1$, і створює магнітне поле з числом пар полюсів p_2 , яке обертається стосовно ротора в напрямку обертання ротора з частотою

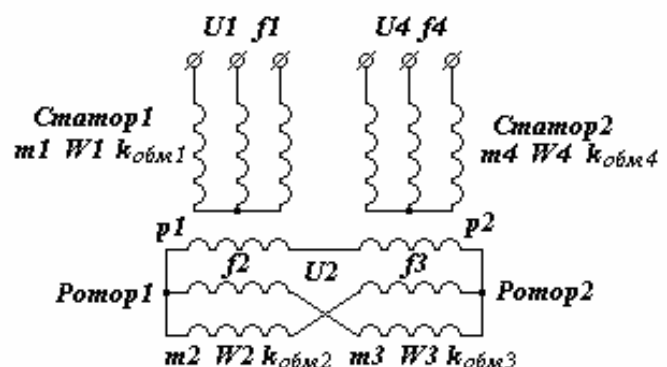
$$n_{c3} = \frac{f_3}{p_2} = \frac{p_1 n - f_1}{p_2} > 0. \quad (4)$$

Стосовно статора це поле буде обертатись з частотою, яка дорівнює сумі частоти обертання поля стосовно ротора і частоти обертання ротора:

$$n_{c4} = n + n_{c3} = n + \frac{f_3}{p_2} = n + \frac{p_1 n - f_1}{p_2}. \quad (5)$$

При цьому в обмотці 4 статора 2 буде наводитись електрорушійна сила і протікати струм з частотою

$$f_4 = p_2 n_{c4} = (p_1 + p_2)n - f_1. \quad (6)$$



Щоб підтримувати частоту напруги на виході каскаду на заданому рівні f при зміні частоти обертання, необхідно змінювати частоту збудження f_1 відповідно до (6). Рівняння рівноваги напруги мають такий вигляд:

$$\text{для обмотки 1} - \quad \dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 z_{s1}; \quad (7)$$

$$- \text{“} - \quad 2 - \quad \dot{U}_2 + \dot{E}_2 = \dot{I}_2 z_{s2}; \quad (8)$$

$$- \text{“} - \quad 3 - \quad \dot{U}_3 + \dot{E}_3 = \dot{I}_3 z_{s3}; \quad (9)$$

$$- \text{“} - \quad 4 - \quad \dot{E}_4 = \dot{I}_4 (z_{s4} + Z_n). \quad (10)$$

Тут $z_{s1} = r_1 + jx_{s1}$, $z_{s2} = r_2 + jx_{s2}$, $z_{s3} = r_3 + jx_{s3}$, $z_{s4} = r_4 + jx_{s4}$, $Z_n = R_n + jX_n$ – активні опори та індуктивні опори розсіювання обмоток 1...4 при відповідній частоті та активний і реактивний опори навантаження.

Для розв'язання системи рівнянь рівноваги напруги необхідно привести рівняння до однієї системи координат. Приведемо напругу, ЕРС та опори до однієї частоти f_4 (запишемо рівняння рівноваги напруги стосовно статора 2, знайшовши ковзання обмоток стосовно відповідних магнітних полів). Оскільки $n_{c3} = n_{c4} - n$, а $n_{c3} = \frac{f_3}{p_2}$ і $n_{c4} = \frac{f_4}{p_2}$, то

$$f_3 = f_4 - p_2 n = f_4 \left(1 - \frac{p_2 n}{f_4}\right) = f_4 \left(1 - \frac{n}{n_{c4}}\right) = f_4 \left(\frac{n_{c4} - n}{n_{c4}}\right) = f_4 s_3. \quad (11)$$

Аналогічно для (1)...(3)

$$f_1 = f_2 + p_1 n = f_2 \left(1 + \frac{p_1 n}{f_2}\right) = f_2 \left(1 - \frac{n}{n_{c2}}\right) = f_2 \left(\frac{n_{c2} - n}{n_{c2}}\right) = f_2 s_2. \quad (12)$$

Врахувавши, що $f_2 = -f_3$ (обмотки 2 і 3 мають різне чергування фаз), знайдемо

$$f_1 = -f_3 s_2 = -f_4 s_2 s_3 = f_4 s_1. \quad (13)$$

Виразимо s_2 та s_3 через s_1 :

$$p_1 n = f_1 - f_2 = f_4 s_1 + f_3 = f_4 s_1 + f_4 s_3 = f_4 (s_1 + s_3); \quad (14)$$

$$p_2 n = f_4 - f_3 = f_4 (1 - s_3);$$

$$n = \frac{f_4 (1 + s_1)}{p_1 + p_2}. \quad (15)$$

Підставивши n із (15) у формули для відповідного ковзання, отримаємо

$$s_3 = \left(1 - \frac{n}{n_{c4}}\right) = 1 - \frac{f_4 (1 + s_1) p_2}{(p_1 + p_2) f_4} = \frac{p_1 - p_2 s_1}{p_1 + p_2}; \quad (16)$$

$$s_2 = 1 - \frac{n}{n_{c2}} = 1 + \frac{f_4 (1 + s_1) p_1}{(p_1 + p_2) f_2} = 1 - \frac{f_4 (1 + s_1) p_1}{(p_1 + p_2) f_4 s_3} = 1 - \frac{(1 + s_1) p_1}{p_1 - p_2 s_1} = -\frac{(p_1 + p_2) s_1}{p_1 - p_2 s_1}. \quad (17)$$

З виразу (16) видно, що при $s_1 = p_1 / p_2$ ковзання $s_3 = 0$. Тобто при $n = f_4 / p_2$ частота струму і ЕРС в обмотках ротора дорівнює нулю, а значить, генерація потужності в асинхронному режимі неможлива. Для забезпечення ширшого діапазону зміни частоти обертання без порушення працездатності каскаду доцільно вибирати $p_2 < p_1$.

Оскільки s_3 ковзання обмоток ротора стосовно магнітного поля, записаного в системі координат, зв'язаної з обмоткою 4, то для приведення рівнянь (8) і (9) до цієї системи необхідно ліву і праву частини цих рівнянь поділити на s_3 . Ковзання s_2 характеризує обертання обмотки 1 відносно магнітного поля, записаного в системі координат, зв'язаній з ротором, а ковзання s_1 – у системі координат, зв'язаній з статором 2. Тому для приведення рівняння (7) до системи координат, зв'язаної з обмоткою 4, необхідно ліву і праву частини цих рівнянь поділити на s_1 . Тоді всі рівняння будуть стосуватись однієї частоти f_4 , а в позначення величин, які входять в нові рівняння, додамо індекс s .

Для приведення рівнянь до однакового числа фаз з однаковими числами витків у фазі необхідно знайти коефіцієнт приведення ЕРС та напруги, який дорівнює результату ділення

ЕРС фази, до якої приводиться обмотка, на ЕРС фази обмотки, параметри якої наводяться:

$$k_{e2} = \frac{E_4}{E_{3s}} = \frac{4,44 f_4 W_4 k_{обм4}}{4,44 f_4 W_3 k_{обм3}} = \frac{W_4 k_{обм4}}{W_3 k_{обм3}}. \quad (18)$$

Відповідно до цього приведені ЕРС і напруга обмоток ротора запишуться так:

$$E'_3 = k_{e2} E_{3s} = E_4; \quad (19)$$

$$E'_2 = k_{e2} E_{2s}; \quad (20)$$

$$U'_2 = U'_3 = k_{e2} U_{2s} = k_{e2} U_{3s}. \quad (21)$$

Коефіцієнт приведення ЕРС і напруги обмотки 1 до приведеної обмотки 2 знайдемо аналогічно:

$$k_{e1} = \frac{E'_2}{E_{1s}} = \frac{4,44 f_4 W_2 k_{обм2} \Phi_1 k_{e2}}{4,44 f_4 W_1 k_{обм1} \Phi_1} = \frac{W_4 k_{обм4} W_2 k_{обм2}}{W_3 k_{обм3} W_1 k_{обм1}}. \quad (22)$$

Відповідно до цього приведені ЕРС і напруга обмотки 1 запишуться як

$$E'_1 = k_{e1} E_{1s} = E'_2; \quad (23)$$

$$U'_1 = k_{e1} U_{1s}. \quad (24)$$

Коефіцієнти приведення струмів визначаються з рівності магніторушійних сил вихідної та приведеної обмоток. Приведемо струми обмоток ротора до числа витків і фаз обмотки 4:

$$m_4 W_4 k_{обм4} I'_3 = m_3 W_3 k_{обм3} I_3; \quad (25)$$

$$k_{i2} = \frac{m_4 W_4 k_{обм4}}{m_3 W_3 k_{обм3}}; \quad (26)$$

$$I'_3 = \frac{I_3}{k_{i2}}; \quad I_3 = k_{i2} I'_3; \quad (27)$$

$$I_2 = I_3; \quad I'_2 = I'_3. \quad (28)$$

Приведемо аналогічно обмотку 1 до числа витків і фаз обмотки 2, приведеної до обмотки 4:

$$k_{i1} = \frac{m_4 W_4 k_{обм4} W_2 k_{обм2}}{m_1 W_1 k_{обм1} W_3 k_{обм3}}; \quad (29)$$

$$I'_1 = \frac{I_1}{k_{i1}}; \quad I_1 = k_{i1} I'_1. \quad (30)$$

Приведені активні та реактивні опори дорівнюють добутку вихідних опорів, приведених до однієї частоти, і коефіцієнтів приведення ЕРС і струмів:

$$r'_1 = r_1 k_{i1} k_{e1} = r_1 \frac{m_4}{m_1} \left(\frac{W_2 k_{обм2} W_4 k_{обм4}}{W_1 k_{обм1} W_3 k_{обм3}} \right)^2; \quad (31)$$

$$x'_{s1} = x_{s1} k_{i1} k_{e1} = x_{s1} \frac{m_4}{m_1} \left(\frac{W_2 k_{обм2} W_4 k_{обм4}}{W_1 k_{обм1} W_3 k_{обм3}} \right)^2; \quad (32)$$

$$x'_{m1} = x_{m1} k_{i1} k_{e1} = x_{m1} \frac{m_4}{m_1} \left(\frac{W_2 k_{обм2} W_4 k_{обм4}}{W_1 k_{обм1} W_3 k_{обм3}} \right)^2; \quad (33)$$

$$r'_2 = r_2 k_{i2} k_{e2} = r_2 \frac{m_4}{m_3} \left(\frac{W_4 k_{обм4}}{W_3 k_{обм3}} \right)^2; \quad (34)$$

$$r'_3 = r_3 k_{i2} k_{e2} = r_3 \frac{m_4}{m_3} \left(\frac{W_4 k_{обм4}}{W_3 k_{обм3}} \right)^2; \quad (35)$$

$$x'_{s2} = x_{s2} k_{i2} k_{e2} = x_{s2} \frac{m_4}{m_3} \left(\frac{W_4 k_{обм4}}{W_3 k_{обм3}} \right)^2; \quad (36)$$

$$x'_{s3} = x_{s3} k_{i2} k_{e2} = x_{s3} \frac{m_4}{m_3} \left(\frac{W_4 k_{обм4}}{W_3 k_{обм3}} \right)^2. \quad (37)$$

Схема заміщення для цих параметрів і рівнянь аналогічна приведеній у статті [1]. Різниця між схемою заміщення для рівнянь (7)...(10) відносно приведених значень параметрів, напруги та струмів і відомою обумовлена генераторним режимом роботи каскаду і врахуванням напрямку обертання створюваного обмоткою магнітного поля знаком частоти струму обмотки.

Напрузі та параметрам обмотки 1 відомої схеми відповідають напруга і параметри обмотки 4 каскаду. Контур намагнічування $j\omega M_1$ відомої схеми відповідає jx_{m4} отриманих рівнянь. Параметри роторних обмоток поділені: приєднані до jx_{m4} параметри обмотки 3 $\frac{r'_3}{s_3}$ та jx'_{s3} і приєднані до них послідовно параметри обмотки 2 $\frac{r'_2}{-s_3}$ та jx'_{s2} . Другому контуру намагнічування $j\omega M_2$ відомої схеми відповідає jx'_{m1} отриманих рівнянь. Напрузі й параметрам обмотки 2 цієї схеми відповідають приведені напруга і параметри обмотки 1 каскаду.

Висновки. Проведений аналіз поведінки каскаду в умовах генераторного режиму при регулюванні частоти і напруги збудження показав його працездатність при частоті обертання ротора, меншій від синхронної частоти обертання магнітного поля вихідної машини каскаду. Для збільшення допустимого діапазону зміни частоти обертання без порушення працездатності каскаду доцільно вибирати число полюсів вихідної машини каскаду меншим, ніж число полюсів машини збудження каскаду. Отримані співвідношення для параметрів машин каскаду та система рівнянь рівноваги напруги дають змогу розрахувати необхідні значення напруги і частоти струму збудження для підтримання вихідної напруги за величиною і частотою.

1. Антоненко А.И. Уравнения машины с внутренним каскадом. Схема замещения // Проблемы технической электродинамики. – 1972. – Вып. 33 – С. 77–81.
2. Ветроэнергетика // <http://ru.wikipedia.org/>
3. Комаров Н.С., Возный В.А. Сверхмощный транзисторный регулятор постоянного тока с высокочастотной импульсной модуляцией // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2003. – №2(5). – С. 27–43
4. Стогній Б.С., Денисюк С.П. Глобальні енергетичні процеси, роль та місце енергетики України в їх розвитку // Техн. електродинаміка. Темат. вип. «Проблеми сучасної електротехніки». – 2004. – Ч. 1. – С. 7–11.

УДК 621.313.03

А.И. Антоненко, канд. техн. наук

Киевский национальный университет технологий и дизайна,

ул. Немировича-Данченко, 2, Киев, 01011, Украина

Каскадный электрогенератор для ветроэнергетической установки

Рассмотрена возможность создания безредукторного автономного генератора переменного тока промышленной частоты для силовой ветроэнергетической установки с небольшой (около 300 об/мин) частотой вращения и получения соотношений между его параметрами. Библиограф. 4, рисунок.

Ключевые слова: электрическая машина, фазный ротор, каскадное соединение, обмотка.

A.I. Antonenko

Kyiv National University of Technology and Design,

Nemyrovycha-Danchenka, 2, Kyiv, 01011, Ukraine

Cascade electric generator for wind turbine

The work is devoted to the analysis of possibilities of creating a gearless stand-alone generator of AC of industrial frequency for power wind turbine with a small (about 300 r. p. m.) speed and the derivation of relations between its parameters. For this purpose a cascade connection of two electric machines with the phase rotor is used. The resulting correlation between the frequency of the excitation current, windings current and rotor speed of rotation is obtained to maintain the stable frequency of the generator output voltage. Bringing the equations of equilibrium voltage in machine windings and windings parameters to the same frequency is considered, which allows using the equivalent circuit of the generator to calculate its performance in the steady mode. References 4, figure.

Key words: electric machine, phase rotor slip ring, cascade connection, winding.

Надійшла 03.03.2014

Received 03.03.2014