

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЧАСТОТНО-УПРАВЛЯЕМОГО АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ВЕТРОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

Докт. техн. наук, проф. МУСТАФАЕВ Р. И.¹⁾,
докт. техн. наук САИДОВ Р. А.²⁾, канд. техн. наук ГАСАНОВА Л. Г.¹⁾

¹⁾Азербайджанский научно-исследовательский
и проектно-изыскательский институт энергетики,
²⁾Азербайджанский технологический университет

E-mail: mustafayevri@mail.ru

INVESTIGATION ON ESTABLISHED OPERATIONAL MODES OF FREQUENCY-CONTROLLED INDUCTION GENERATOR OF WIND POWER PLANTS

MUSTAFAYEV R. I.¹⁾, SAIDOV R. A.²⁾, HASANOVA L. G.¹⁾

¹⁾Azerbaijan Scientific-Research & Design-Prospecting Power Engineering Institute,

²⁾Azerbaijan Technological University

Предложено аналитическое выражение для расчета регулируемой величины статорного напряжения частотно-управляемого асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором ветроэлектрической установки при регулировании на постоянство величины абсолютного скольжения генератора. Сопоставление результатов расчета по предложенному выражению и по полным дифференциальным уравнениям генератора (уравнения состояния) при установившемся режиме подтвердило высокую точность аналитического выражения.

Ключевые слова: частотно-управляемый асинхронный генератор, ветроэлектрическая установка, режим работы, регулируемая величина статорного напряжения.

Ил. 1. Табл. 1. Библиогр.: 5 назв.

The paper proposes an analytical expression for calculating a manipulated variable of stator voltage in a frequency-controlled induction generator with a cage rotor of a wind power plant while regulating a constant value of the absolute slip of the generator. Comparison of the calculated results by the proposed expression and full differential equations of the generator (an equation of state) at steady state has confirmed a high accuracy of the analytical expression.

Keywords: frequency-controlled induction generator, wind power plant, operational modes, manipulated variable of stator voltage.

Fig. 1. Tab. 1. Ref.: 5 titles.

В последние годы становится все более очевидным, что энергетику ближайшего будущего трудно представить без широкого использования возобновляемых источников энергии (ВИ). Ветроэнергетика в настоящее время – это одна из быстроразвивающихся отраслей мировой электроэнергетики. К концу 2012 г. установленная мощность всех ветроэлектрических установок (ВЭУ) в мире приблизилась к 275 ГВт [1].

В современных ВЭУ для повышения производительности в определенной области изменения скоростей ветра требуется регулировать частоту вращения генератора ВЭУ, поэтому в подавляющем большинстве случаев используются преобразователи частоты, работающие совместно с электро-

механическими. В качестве электромеханических преобразователей в ВЭУ находят применение низкоскоростные синхронные генераторы, асинхронные машины с короткозамкнутым ротором и двойного питания.

Следует отметить, что в общем случае вопросы частотного регулирования асинхронных генераторов были в какой-то мере отражены в разных работах, но моментные характеристики ветродвигателей в них представлены сложной зависимостью. Также не нашли полного отражения вопросы асинхронного пуска, оптимального управления переходными процессами с помощью различных законов управления как амплитуды напряжения, так и его частоты.

В [2, 3] представлена математическая модель (модель состояния) и проведены исследования на этой модели различных режимов работы ВЭУ, содержащих асинхронные генераторы, частотно-управляемые со стороны как статора, так и ротора. При частотном управлении асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором ВЭУ (установки типа Siemens Wind Power Ecotecnica 100) со стороны статора исследованы режимы работы при регулировании напряжения на постоянство как относительного скольжения генератора, так и потребляемой реактивной мощности. Выявлено, что первый режим согласуется с известным законом частотного управления М. П. Костенко.

Для сопоставительного анализа приведем расчет аналитическим методом режима частотного управления рассмотренным асинхронным генератором. В установившемся режиме работы момент асинхронного генератора, управляемого изменением частоты со стороны статора, будет уравновешиваться моментом ветродвигателя, приведенного к валу генератора:

$$m_{эм}(y, \alpha, \beta) = m_{вд}, \quad (1)$$

где $m_{эм}(y, \alpha, \beta)$ – электромагнитный момент асинхронного генератора ВЭУ, в общем случае зависящий от величины напряжения y , частоты тока питания α и абсолютного скольжения β ; $m_{вд}$ – момент ветродвигателя.

Согласно [4, 5], уравнение для электромагнитного момента генератора можно представить в виде

$$m_{эм} = \frac{Ay^2}{B + C\alpha^2 + D\alpha}, \quad (2)$$

где

$$A = - \left[2r_s + (b^2 + c^2) \frac{s_n}{r_r} + (d^2 + e^2) \frac{r_r}{s_n} \right]; \quad B = b^2 \frac{\beta}{r_r} + d^2 \frac{r_r}{\beta};$$

$$C = c^2 \frac{\beta}{r_r} + e^2 \frac{r_r}{\beta}; \quad D = -2r_s.$$

В свою очередь:

$$b = -r_s \left(1 + \frac{x_{gr}}{x_m} \right); \quad e = 1 + \frac{x_{gs}}{x_m}; \quad c = x_{gs} + x_{gr} \left(1 + \frac{x_{gs}}{x_m} \right); \quad d = -\frac{r_s}{x_m}.$$

Необходимо отметить, что в общем случае параметры роторной цепи генератора при частотном управлении зависят от абсолютного скольжения.

Но при установившихся режимах работы абсолютное скольжение β , как правило, не должно превышать значение номинального скольжения s_n , т. е. $0 < \beta \leq s_n$, поэтому можно считать эти параметры постоянными, значения которых соответствуют $s \approx 0$.

Однако при пренебрежении активным сопротивлением статорной цепи $r_s = 0$, что можно сделать при относительно больших мощностях асинхронного генератора, выражение (2) значительно упрощается и принимает вид аналога уравнения Клосса для частотного управления

$$m_{эм} = - \frac{y^2 \left[c^2 \frac{s_n}{r_r} + e^2 \frac{r_r}{s_n} \right]}{\alpha^2 \left[c^2 \frac{\beta}{r_r} + e^2 \frac{r_r}{\beta} \right]}. \quad (3)$$

Выражение для момента ветродвигателя при приведении его к валу генератора в зоне регулирования скорости вращения генератора пропорционально скорости ветра можно представить в виде [3]

$$m_{вд} = k_{мг} \omega^2, \quad (4)$$

где $\omega = \frac{\omega_{вд} i}{\omega_0}$; $m_{вд} = \frac{M_{вд}}{i M_n}$; $k_{мг} = \frac{\omega_0^2 k_m}{i^3 M_n}$; $k_m = \frac{k_p R^3}{Z_{опт}^3}$; $k_p = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 c_{p,ср}$; M_n, ω_0 – номинальный момент и синхронная частота вращения ротора генератора; i – передаточное число редуктора.

Подставляя выражения (3) и (4) в (1) и имея в виду, что $\omega = \alpha + \beta$, получим

$$\frac{y^2 F}{\alpha^2 E} = k_{мг} (\beta + \alpha)^2, \quad (5)$$

где

$$F = c^2 \frac{s_n}{r_r} + e^2 \frac{r_r}{s_n}; \quad E = c^2 \frac{\beta}{r_r} + e^2 \frac{r_r}{\beta}.$$

При регулировании на постоянство абсолютного скольжения, т. е. при $\beta = \beta_{опт} = \text{const}$ во всем диапазоне регулирования, получим выражение, по которому необходимо регулировать напряжение:

$$y = \alpha \sqrt{\frac{k_{мг} E}{F} \alpha^2 + \frac{2 k_{мг} E \beta_{опт}}{F} \alpha + \frac{k_{мг} E}{F} \beta_{опт}^2}. \quad (6)$$

При учете активного сопротивления статорной обмотки, т. е. при $r_s \neq 0$, выражение усложняется и принимает вид

$$y = \sqrt{\frac{k_{мг}}{A}} \sqrt{C \alpha^4 + N \alpha^3 + L \alpha^2 + I \alpha + B \beta_{опт}^2}, \quad (7)$$

где

$$N = D + 2\beta_{\text{опт}} C; \quad L = B + 2\beta_{\text{опт}} D + \beta_{\text{опт}}^2 C; \quad I = 2\beta_{\text{опт}} B + \beta_{\text{опт}}^2 D.$$

Сравним результаты расчета оптимальной диаграммы, полученной по формуле (7), с расчетом установившегося режима по полным алгебро-дифференциальным уравнениям асинхронного генератора ВЭУ [3], которые представлены в виде:

$$\left. \begin{aligned} p\psi_{s\alpha} &= U_s y_s \cos(\alpha_s \tau) - r_s i_{s\alpha}; \\ p\psi_{s\beta} &= -U_s y_s \sin(\alpha_s \tau) - r_s i_{s\beta}; \\ p\psi_{r\alpha} &= \psi_{r\beta} \omega - r_r i_{r\alpha}; \\ p\psi_{r\beta} &= -\psi_{r\alpha} \omega - r_r i_{r\beta}; \\ p\omega &= \frac{1}{T_j} m_{\text{эм}} - \frac{1}{T_j} m_{\text{вд}}; \\ i_{s\alpha} &= k_s \psi_{s\alpha} - k_m \psi_{r\alpha}; \\ i_{s\beta} &= k_s \psi_{s\beta} - k_m \psi_{r\beta}; \\ i_{r\alpha} &= k_r \psi_{r\alpha} - k_m \psi_{s\alpha}; \\ i_{r\beta} &= k_r \psi_{r\beta} - k_m \psi_{s\beta}; \\ m_{\text{эм}} &= \psi_{r\alpha} i_{r\beta} - \psi_{r\beta} i_{r\alpha}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$k_s = \frac{x_r}{x_s x_r - x_m^2}; \quad k_r = \frac{x_s}{x_s x_r - x_m^2}; \quad k_m = \frac{x_m}{x_s x_r - x_m^2}.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 1, причем регулирование ведется на постоянство абсолютного скольжения $\beta = \text{const}$, а изменение скорости ветра и соответственно момента ветродвигателя, приведенного к валу генератора, взято из реальной флюктограммы изменения скорости ветра на Абшероне Азербайджана.

Параметры генератора в относительных единицах: $r_s = 0,01$; $r_r = 0,031$; $x_{\text{ос}} = 0,078$; $x_{\text{ор}} = 0,1$; $x_m = 4,3$; $s_n = 0,035$; $x_s = 4,378$; $x_r = 4,4$; $k_{\text{мг}} = 0,64$; $\omega_0 = 157 \text{ 1/с}$; $T_j = 100 \text{ рад}$; $\beta_{\text{опт}} = 0,018$; $k_p = 0,171$; $i = 33$; $M_n = 690 \text{ Нм}$; $P_n = 110 \text{ кВт}$.

Значения рассчитанных коэффициентов: $b = 0,0225$; $c = 0,1798$; $e = 1,018$; $d = 0,0051$; $A = 0,9989$; $B = 0,0003387$; $C = 1,8$; $D = 0,044$; $N = 0,1088$; $L = 0,0025$; $I = 0,000026$.

Конечная формула расчета после упрощений для данного генератора принимает вид

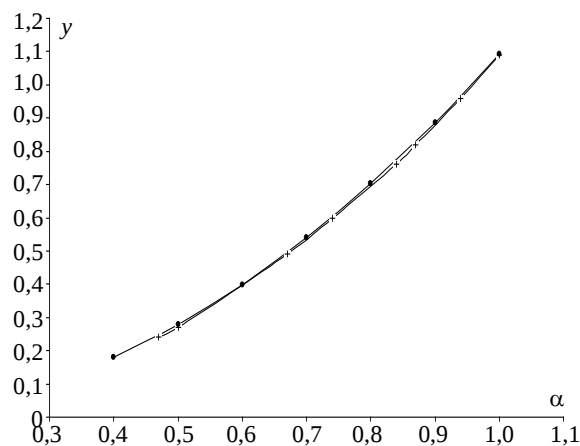
$$y = \alpha \sqrt{1,15\alpha^2 + 0,0438\alpha}. \quad (9)$$

Кривые $y = f(\alpha)$, построенные по формуле (9) (точки), и значения (крестики), взятые из табл. 1, приведены на рис. 1. Из сопоставления видно, что данные табл. 1 практически находятся на кривой $y = f(\alpha)$, полученной по (9). Это указывает на правомерность применения предложенного аналитического выражения.

Таблица 1

Результаты исследования квазистационарного режима на постоянство $\beta = \text{const}$

№	$v, \text{ м/с}$	$m_{\text{эм}}, \text{ о. е.}$	$\omega_r, \text{ о. е.}$	$y_s, \text{ о. е.}$	$\alpha_s, \text{ о. е.}$	$p_{\text{эм}}, \text{ о. е.}$	$\beta = \omega_r - K_{fs}, \text{ о. е.}$
1	7,00	-0,303	0,688	0,49	0,67	-0,208	0,018
2	8,75	-0,471	0,858	0,76	0,84	-0,404	0,018
3	9,80	-0,587	0,958	0,96	0,94	-0,562	0,018
4	10,50	-0,663	1,018	1,09	1,00	-0,675	0,018
5	7,70	-0,367	0,758	0,60	0,74	-0,278	0,018
6	9,10	-0,505	0,888	0,82	0,87	-0,448	0,018
7	5,25	-0,172	0,518	0,27	0,50	-0,089	0,018
8	9,10	-0,505	0,888	0,81	0,87	-0,449	0,018
9	8,89	-0,479	0,865	0,78	0,847	-0,414	0,018
10	5,25	-0,172	0,518	0,27	0,50	-0,089	0,018
11	4,90	-0,152	0,488	0,24	0,47	-0,074	0,018
12	4,90	-0,152	0,488	0,24	0,47	-0,074	0,018
13	4,90	-0,152	0,488	0,24	0,47	-0,074	0,018
14	7,00	-0,303	0,688	0,49	0,67	-0,208	0,018
15	8,75	-0,417	0,858	0,76	0,84	-0,404	0,018
16	9,80	-0,587	0,958	0,96	0,94	-0,562	0,018
17	7,00	-0,303	0,688	0,49	0,67	-0,208	0,018
18	5,25	-0,172	0,518	0,27	0,50	-0,089	0,018
19	7,00	-0,303	0,688	0,49	0,67	-0,208	0,018
20	5,25	-0,172	0,518	0,27	0,50	-0,089	0,018
21	9,10	-0,505	0,888	0,82	0,87	-0,448	0,018
22	9,10	-0,505	0,888	0,82	0,87	-0,448	0,018
23	8,75	-0,471	0,858	0,76	0,84	-0,404	0,018
24	6,30	-0,244	0,618	0,39	0,60	-0,151	0,018

Рис. 1. Зависимость $y = f(\alpha)$ при управлении на постоянство $\beta = \text{const}$:

- ● — — по предложенному аналитическому выражению;
- × — — по полным алгебро-дифференциальным уравнениям при установившемся режиме

ВЫВОДЫ

1. Предложено аналитическое выражение для расчета регулируемой величины статорного напряжения частотно-управляемого асинхронного генератора с короткозамкнутым ротором ветроэлектрических установок.
2. Сравнительный анализ расчета установившегося режима работы асинхронного генератора ветроэлектрических установок по предложенному аналитическому выражению и по полным уравнениям показал, что максимальная погрешность не превышает 2 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. The World Wind Energy Association. Half-year Report. 2012. www.wwindea.org
2. М у с т а ф а е в, Р. И. Моделирование динамических и статических режимов работы ветроэлектрической установки с асинхронной машиной двойного питания / Р. И. Мустафаев, Л. Г. Гасанова // *Электротехника*. – 2008. – № 9. – С. 11–15.
3. М у с т а ф а е в, Р. И. Моделирование и исследование квазистационарных режимов работы ветроэлектрических установок с асинхронными генераторами при частотном управлении / Р. И. Мустафаев, Л. Г. Гасанова // *Электричество*. – 2009. – № 6. – С. 36–41.
4. Б у л г а к о в, А. А. Частотное управление асинхронными электродвигателями / А. А. Булгаков. – М.: Наука, 1966.
5. М у с т а ф а е в, Р. И. Исследование переходных процессов в системе «ветродвигатель – асинхронный генератор» / Р. И. Мустафаев, Ю. М. Курдюков, Б. А. Листенгартен // *Сб. научных трудов ЭНИНа. Научно-технические проблемы комплексного использования возобновляемых источников энергии*. – М., 1986. – С. 182–188.

REFERENCES

1. *The World Wind Energy Association. Half-year Report* (2012) Available at: www.wwindea.org
2. M u s t a f a e v, R. I., & Gasanova, L. G. (2008) Modeling of Dynamic and Static Operational Modes of Wind Power Plant with Double-Fed Asynchronous Machine. *Elektrotehnika [Electrical Engineering]*, (9), 11–15.
3. M u s t a f a e v, R. I., & Gasanova, L. G. (2009) Modeling and Investigation of Quasi-Stationary Operational Modes of Wind Power Plants with Frequency-Controlled Induction Generators. *Elektrichestvo [Electricity]*, (6), 36–41.
4. B u l g a k o v, A. A. (1966) *Frequency Control of Induction Electric Motors*. Moscow: Nauka.
5. M u s t a f a e v, R. I., Kurdioukov, Yu. M., & Listengarten, B. A. (1986) Investigations on Transient Processes in the System “Wind Motor – Induction Generator”. *ENIN Sbornik Nauchnykh Trudov. Nauchno-Tekhnicheskie Problemy Kompleksnogo Ispol'zovaniia Vozobnovliaemykh Istochnikov Energii* [ENIN Collection of Scientific papers. Scientific and Technical Problems of Complex Usage of Renewable Energy Sources]. Moscow. 182–188.

Поступила 15.10.2013