

## РЕЖИМЫ РАБОТЫ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ИНВЕРТОРНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Лукутин Б.В., Шандарова Е.Б.

ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», Томск, Россия, (634050, г. Томск, проспект Ленина, 30), e-mail: [shandarovaelena@mail.ru](mailto:shandarovaelena@mail.ru)

В статье представлены результаты исследования режимов работы дизельной электростанции с переменной частотой вращения, в соответствии с текущей нагрузкой станции. В результате моделирования работы дизельной электростанции на активно-индуктивную нагрузку определена величина напряжения на выходе генератора при изменении частоты вращения дизель-генератора, в соответствии с условием минимизации удельного расхода топлива при неизменном токе возбуждения. Показано, что формирование специальных режимов работы дизельной электростанции, характеризуемых соответствием частоты вращения дизель-генератора мощности, отдаваемой в нагрузку, позволяет ограничить величину отклонения выходного напряжения генератора от номинального значения в пределах 30% при неизменном номинальном токе возбуждения синхронного генератора. Это позволяет существенно снизить требования к системе возбуждения синхронного генератора инверторной дизельной электростанции и упростить ее схемную реализацию. Предложен вариант схемного решения системы возбуждения синхронного генератора инверторной дизельной электростанции, работающей при переменной частоте вращения дизель-генератора.

Ключевые слова: дизельная электростанция, дизель-генератор, расход топлива, эффективность, нагрузка, система возбуждения.

## OPERATION MODES OF THE SYNCHRONOUS GENERATOR OF INVERTER DIESEL POWER STATION

Lukutin B.V., Shandarova E.B.

National Research Tomsk Polytechnic University, Tomsk, Russia, (634050, Tomsk, Lenin Avenue, 30), e-mail: [shandarovaelena@mail.ru](mailto:shandarovaelena@mail.ru)

Results of research of operation modes of diesel power station are presented in article with a variable frequency of rotation, according to the current loading of station. As a result of modeling of work of diesel power station the size of output voltage of the generator is determined at change of frequency of rotation of the diesel generator, according to a condition of minimization of specific fuel consumption at invariable excitation current. It is shown that formation of special operation modes of diesel power station which are characterized by compliance of frequency of rotation of the diesel generator of power of loading, allows to limiting the size of a deviation of output voltage of the generator from nominal rate within 30% at invariable excitation current of the synchronous generator. It allows to lower requirements to excitation system of the synchronous generator of inverter diesel power station and to simplify its circuit realization. The version of the circuit decision of excitation system of the synchronous generator of the inverter diesel power station working with a variable frequency of rotation of the diesel generator is offered.

Key words: diesel power station, diesel generator, fuel consumption, efficiency, loading, excitation system.

### Введение

Электроснабжение хозяйственных объектов и населенных пунктов на большей части территории России, характеризующейся малым населением и слабо развитой инфраструктурой, осуществляется от автономных дизельных электростанций (ДЭС). Переменный график электрических нагрузок локальной системы электроснабжения затрудняет оптимизацию режимов работы ДЭС, что приводит к повышенному расходу дизельного топлива и удорожанию производимой электроэнергии. Дизельные электростанции, имеющие в своем составе регуляторы частоты и величины выходного напряжения, работают при постоянных оборо-

тах дизеля для стабилизации частоты выходного напряжения. Такой режим работы, особенно при малых нагрузках, определяет повышенный удельный расход топлива и сокращение рабочего ресурса дизеля.

Одним из перспективных путей повышения энергетической эффективности ДЭС является перевод дизельного двигателя на переменную частоту вращения, в соответствии с его текущей загрузкой, с последующей стабилизацией параметров выходного напряжения полупроводниковыми преобразователями.

Инверторные ДЭС позволяют формировать энергоэффективные режимы работы дизеля, поскольку оптимизация частоты вращения дизель-генератора непосредственно не связана с качеством выходного напряжения электростанции [1; 3; 5]. Условия работы дизель-генератора в составе такого энергетического комплекса характеризуются возможностью снижения частоты вращения до 40% относительно номинальной в зависимости от степени загрузки инверторной ДЭС.

Экспериментальные зависимости, связывающие мощность электрической нагрузки  $P_H$  с частотой вращения дизель-генератора (и, соответственно, с частотой выходного напряжения  $f$ ) при минимальном удельном расходе топлива, определяемом положением рейки топливного насоса  $h$ , представлены на рисунке 1.

Эксперимент проведен на дизельной электростанции KDE12EA3 компании Кирор (КНР). Основные технические характеристики станции: номинальная полная мощность 9,5 кВА; номинальная частота вращения дизельного двигателя 3000 об/мин; синхронный генератор KTS-12 с номинальным действующим значением выходного напряжения 230/400 В частотой 50 Гц.

Очевидно, что общепромышленное энергетическое оборудование обычных ДЭС, в частности синхронные генераторы (СГ), рассчитанные на работу при номинальной частоте вращения, будут работать в специальных режимах. Факторами, определяющими возможные изменения параметров специальных режимов стандартного синхронного генератора, являются ток возбуждения, диапазоны частот вращения и соответствующих величин нагрузок. Указанные факторы определяют величину и частоту генерируемого напряжения.

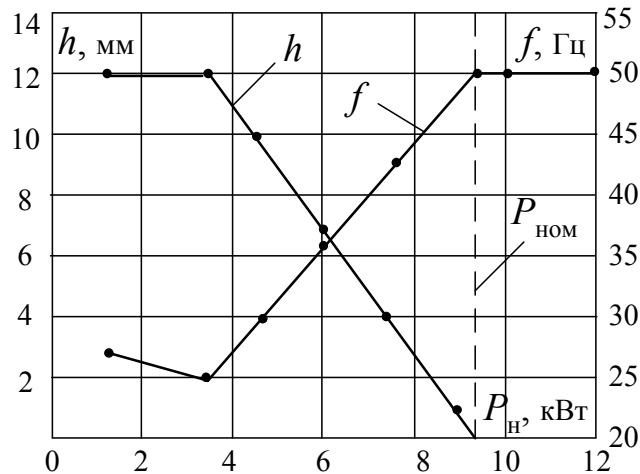


Рис. 1. Графические зависимости, характеризующие оптимальное соотношение частоты генерируемого напряжения и потребляемой мощности ДЭС при минимальном удельном расходе топлива

Исследования [1] позволили установить зависимости предельной и оптимальной (с точки зрения энергоэффективности дизельного двигателя) мощности генератора от частоты его вращения. Графически эти зависимости представлены на рисунке 2. Кривая 1 характеризует максимально возможную активную мощность синхронного генератора в условиях обозначенных ограничений. Ограничением горизонтального участка кривой 1 служит величина напряжения, на наклонном участке кривая ограничена допустимым током обмотки возбуждения. Кривая 2 соответствует оптимальной загрузке синхронного генератора с точки зрения минимизации удельного расхода топлива дизеля.

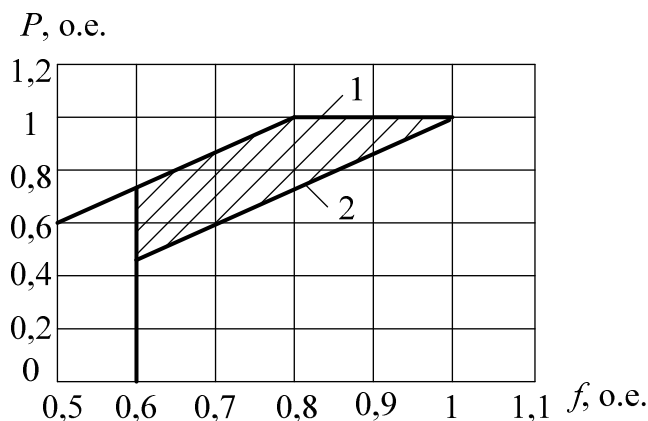


Рис. 2. Предельная и оптимальная мощности СГ в зависимости от частоты вращения дизель-генератора

Невозможность стабилизации напряжения генератора в указанных условиях определяет необходимость исследования и формирования рациональных рабочих режимов дизель-

генератора, с последующей формулировкой требований как к системе возбуждения, так и к входным параметрам преобразователя частоты инверторной ДЭС.

Качество выходного напряжения инверторной ДЭС определяется инвертором, что позволяет использовать в более широком диапазоне величин генерируемое напряжение. Изменение режимных параметров дизель-генератора требует корректировки принципов функционирования системы возбуждения генератора и ее схемных реализаций.

Анализ режимов работы синхронного генератора на автономную нагрузку при переменной частоте его вращения с учетом возможностей регулирования тока возбуждения проводился с использованием программы Simulink, являющейся приложением к пакету Matlab.

При создании виртуальной модели использовался блок Synchronous Machine ru Fundamental, представляющий модель классической синхронной машины с демпферной обмоткой, при этом параметры обмоток статора и ротора машины задаются в относительных единицах.

Непосредственно нагрузкой генератора является выпрямитель, который эквивалентизируется по первым гармоническим составляющим тока и напряжения, активно-индуктивной нагрузкой с коэффициентом мощности, близким к единице. Величина коэффициента мощности определяется длительностью коммутационных процессов вентилях выпрямителя и зависит от сверхпереходного индуктивного сопротивления генератора и величины тока нагрузки выпрямителя.

Ввиду незначительного изменения коэффициента мощности выпрямительной нагрузки можно считать его неизменным в рассматриваемых режимах.

Задачей моделирования являлось определение напряжения на выходе генератора при изменении частоты вращения дизель-генератора, в соответствии с условием минимизации удельного расхода топлива при неизменном токе возбуждения.

Моделирование проводилось для электростанции с номинальной полной мощностью 10 кВА; номинальным действующим значением выходного напряжения 220 В и частотой 50 Гц. Нагрузка станции – активно-индуктивная с коэффициентом мощности  $\cos\varphi=0,97$ .

Параметры явнополюсного синхронного генератора задавались в относительных единицах и изменялись в пределах, характерных для генераторов малой мощности:  $x_d = 1,5 \div 2,2$  о.е.;  $x_q = 0,8 \div 1,1$  о.е.;  $r_a = 0,01$  о.е.;  $x_f = 1,6 \div 2,3$  о.е, где  $x_d$  – синхронное индуктивное сопротивление обмотки якоря генератора по продольной оси;  $x_q$  – синхронное индуктивное сопротивление по поперечной оси генератора;  $r_a$  – активное сопротивление якорной обмотки;  $x_f$  – индуктивное сопротивление обмотки возбуждения [4].

В процессе исследования на вход модели генератора подавались сигналы, один из которых задавал частоту вращения дизель-генератора, а второй – ЭДС обмотки возбуждения, изменяющуюся пропорционально частоте вращения ротора.

Проведенные расчеты показали, что для стандартной конструкции ДЭС при снижении частоты вращения дизеля до 0,6 о.е. при пропорциональном уменьшении загрузки станции (в соответствии с графическими зависимостями, приведенными на рисунке 2), величина напряжения генератора изменяется в соответствии с кривой 1, представленной на рисунке 3. Зависимость получена при условии независимого возбуждения синхронного генератора с величиной тока возбуждения, соответствующей номинальному режиму и  $x_d = 1,5$  о.е.;  $x_q = 0,8$  о.е.;  $x_f = 1,6$  о.е.

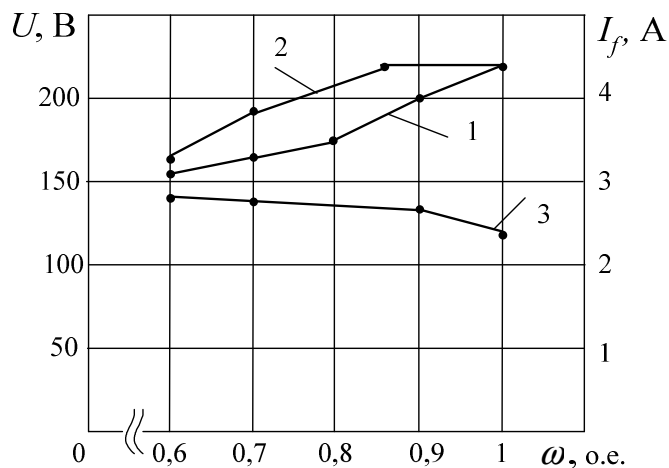


Рис. 3. Зависимости выходного напряжения и тока возбуждения генератора от частоты вращения дизель-генератора (1, 2 – экспериментальные и расчетные значения напряжения на выходе генератора; 3 – изменение тока возбуждения  $I_f$  в процессе эксперимента)

Расчеты показывают, что при уменьшении нагрузки и, соответственно, снижении частоты вращения дизеля напряжение относительно номинального (220 В) снижается до 175 В (уменьшается на 20%) при  $P = 0,75$  о.е.,  $\omega = 0,8$  о.е. и на 31% при  $P = 0,5$  о.е.,  $\omega = 0,6$  о.е., что соответствует экспериментальным данным (рис. 3). Также стоит отметить, что изменения величин реактивных сопротивлений обмотки якоря и обмотки возбуждения не оказывают существенного влияния на отклонение выходного напряжения генератора при принятых условиях численного эксперимента (рис. 3).

Таким образом, для синхронного генератора стандартной конструкции ограничения по тепловому режиму обмотки возбуждения не позволяют стабилизировать выходное напряжение, которое может уменьшаться более чем на 30% при снижении частоты вращения на 40% и, соответственно, величины нагрузки до 50% относительно номинальных значений.

Статический преобразователь частоты инверторной ДЭС должен обеспечивать возможность работы энергоустановки при изменяющемся в указанных пределах напряжении синхронного генератора.

Проведенные исследования показывают, что формирование специальных режимов работы ДЭС, характеризуемых соответствием частоты вращения дизель-генератора отдаваемой в нагрузку мощности, позволяет существенно снизить требования к системе возбуждения СГ инверторной ДЭС и упростить ее схемную реализацию. Очевидным вариантом схемного решения задачи возбуждения СГ, работающего в анализируемых режимах, может являться питание обмотки возбуждения от независимого источника постоянного тока. Весьма перспективным вариантом генератора для инверторной ДЭС является магнитоэлектрический синхронный генератор.

Управление динамическими режимами инверторной ДЭС, вызванными скачкообразным изменением мощности нагрузки, целесообразно осуществлять с помощью инвертора, принципиально имеющего лучшие динамические характеристики, чем электрическая машина.

*Работа выполнена в рамках государственного задания «Наука» 7.2826.2011 «Разработка и создание гибридной модели энергоблоков электростанций»*

### Список литературы

1. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции инверторного типа // Известия вузов. Электромеханика. – 2009. – № 6. – С. 80-82.
2. Мелинский Г.А., Меркурьев Г.В. Устойчивость энергосистем. Книга 1. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.cpk-energo.ru/metod/u1/mm1.pdf](http://www.cpk-energo.ru/metod/u1/mm1.pdf) (дата обращения: 24.06.2013).
3. Обухов С.Г., Сипайлова Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г. Характеристики синхронного генератора, работающего в составе инверторной дизельной электростанции // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2012. - № 5. – С. 41-45.
4. Штерн В.И. Эксплуатация дизельных электростанций. – М. : Энергия, 1980. – 243 с.
5. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Hybrid UPS Based on Supercapacitor Energy Storage and Adjustable Speed Generator // Journal Electrical Power Quality and Utilisation. – 2008. - Vol. XIV, No. 1. - P. 13-24.

### Рецензенты:

Кабышев Александр Васильевич, д.ф.м.н., профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий Энергетического института НИ Томского политехнического университета, г. Томск.

Муравлев Олег Павлович, д.т.н., профессор кафедры электромеханических комплексов и материалов Национального исследовательского Томского политехнического университета, г. Томск.