

ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА, РАБОТАЮЩЕГО В СОСТАВЕ ИНВЕРТОРНОЙ ДИЗЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Обухов С.Г., Сипайлова Н.Ю., Плотников И.А., Сипайлов А.Г.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет

Рассматриваются характеристики синхронного генератора инверторной дизельной электростанции, работающего с переменной частотой вращения. На основе математического моделирования и экспериментальных исследований определены предельные и оптимальные мощности генератора, проведена оценка энергетических показателей и регулировочных возможностей.

Ключевые слова: синхронный генератор, дизельная электростанция, инвертор,

FEATURES SYNCHRONOUS GENERATOR TO SERVE THE INVERTER DIESEL GENERATORS

This paper deals with the performance of inverter diesel power plant synchronous generator, operating at variable speed. Maximum and optimum generator powers, energy efficiency and control ability were determined on the base of mathematical and experimental simulation.

Key words: the synchronous generator, diesel gen set, inverter

Введение

Основными генерирующими источниками систем автономного электроснабжения России являются дизельные электростанции (ДЭС), общее число которых составляет 47 тысяч, а установленная мощность достигает 15 млн. кВт. К недостаткам автономных энергетических систем, построенных на базе ДЭС, относят, прежде всего, значительную топливную составляющую в себестоимости генерируемой энергии, невысокий КПД, относительно низкий эксплуатационный ресурс. Тем не менее, полноценной

Выработка электроэнергии в рассматриваемой электростанции производится дизель-генератором (ДГ), состоящим из дизельного двигателя (ДД) и синхронного генератора (СГ) с электромагнитным возбуждением. В зависимости от величины электрической нагрузки регулятор положения рейки (РПР) топливного насоса обеспечивает автоматическое управление рабочими режимами ДД по заданному закону. Регулятор напряжения (РН) генератора управляет величиной тока обмотки возбуждения (ОВ), поддерживая напряжение на выходных зажимах СГ в требуемых пределах.

Стабилизация выходного напряжения U и частоты f генерируемого тока обеспечивается с помощью силового полупроводникового каскада, состоящего из управляемого выпрямителя-преобразователя (ВП), фильтра (Ф) и автономного инвертора напряжения (АИ). Выпрямитель-преобразователь, наряду с преобразованием трехфазного переменного напряжения в постоянное напряжение, обеспечивает поддержание величины коэффициента мощности на входе, близкой к единице, а также стабилизацию выходного напряжения во всех эксплуатационных режимах СГ.

Для проведения экспериментальных исследований создана специальная установка, построенная на базе общепромышленной ДЭС торговой марки KDE12EA3 компании Kiror (КНР).

Основное оборудование электростанции состоит из дизельного четырехтактного двигателя KM2V80 с номинальной частотой вращения $n_n=3000$ об/мин и явнополусного синхронного генератора с независимым возбуждением типа KTS12 со следующими номинальными данными: частота выходного напряжения $f=50$ Гц, номинальная полная мощность $S_n=9,5$ кВА, номинальное фазное напряжение $U_n=230$ В, номинальный ток $I_n=13,7$ А, коэффициент мощности $\cos\varphi_n=0,8$, коэффициент полезного действия $\eta_n=0,82$, номинальный ток возбуждения $i_{fn}=3,0$ А. Схема соединения статорной обмотки – звезда, активное сопротивление фазы статорной обмотки $r=0,7$ Ом, активное сопротивление обмотки возбуждения $r_f=28$ Ом.

В результате проведенных экспериментов была получена функциональная зависимость, связывающая положение рейки топливного насоса с мощностью электрической нагрузки ДГ, при которой обеспечивается минимальный удельный расход топлива (рис. 2).

Положение рейки топливного насоса h характеризуется смещением от заводской установки (знак «минус» обозначает смещение в сторону уменьшения цикловой подачи топлива) и определяет частоту вращения вала дизеля, и соответственно, частоту генерируемого тока f , значения которой также приведены на рис. 2.

Результаты проведенных экспериментов подтвердили техническую возможность снижения удельного расхода топлива дизельным двигателем при переводе его на переменную частоту вращения. Для типового графика нагрузок, характерного для автономного потребителя, общая экономия топлива может составить до 25 %.

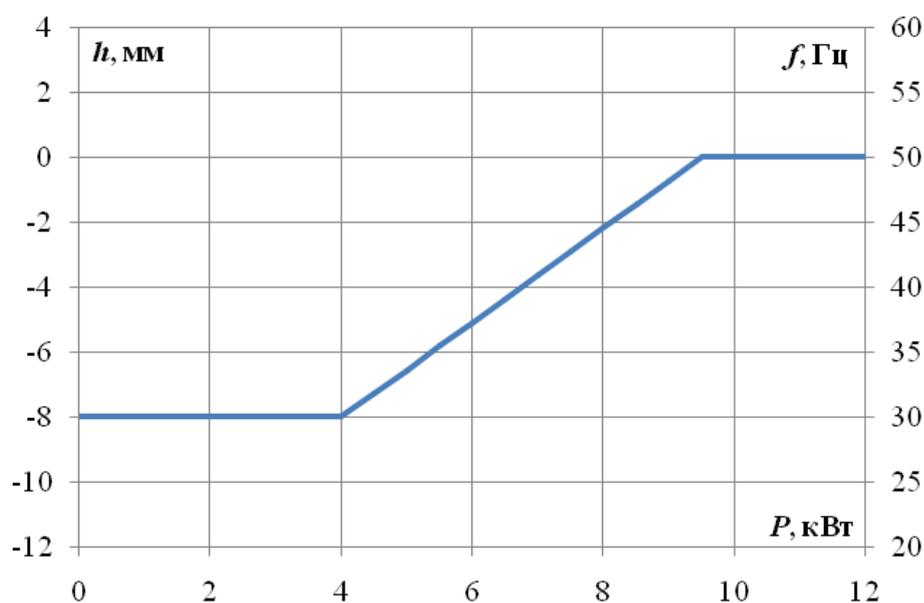


Рис.2. Функциональная зависимость положения рейки топливного насоса от величины электрической нагрузки

Предлагаемая стратегия управления режимами ДЭС предполагает эксплуатацию СГ в диапазоне частот 30-50 Гц, что вызывает необходимость исследования его рабочих режимов и оценки энергетических характеристик.

Инструмент исследования

Для решения поставленных задач была разработана математическая модель синхронного генератора с электромагнитным возбуждением, работающего на автономную электрическую нагрузку (рис. 3).

Моделирование выполнено в системе MatLab с использованием стандартных блоков библиотек Simulink и SimPowerSystem. За базовую принята модель синхронного генератора в системе SI, так как данная модель позволяет учесть насыщение магнитной цепи машины по оси d с помощью характеристики холостого хода, которая может быть получена экспериментально. Индуктивные параметры машины определены из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Моделирование номинального режима, внешних и регулировочных характеристик на разных частотах вращения показало, что модель обеспечивает приемлемую точность воспроизведения установившихся режимов СГ. Отличие расчетных и экспериментальных данных для всех рабочих режимов составило не более 5 %.

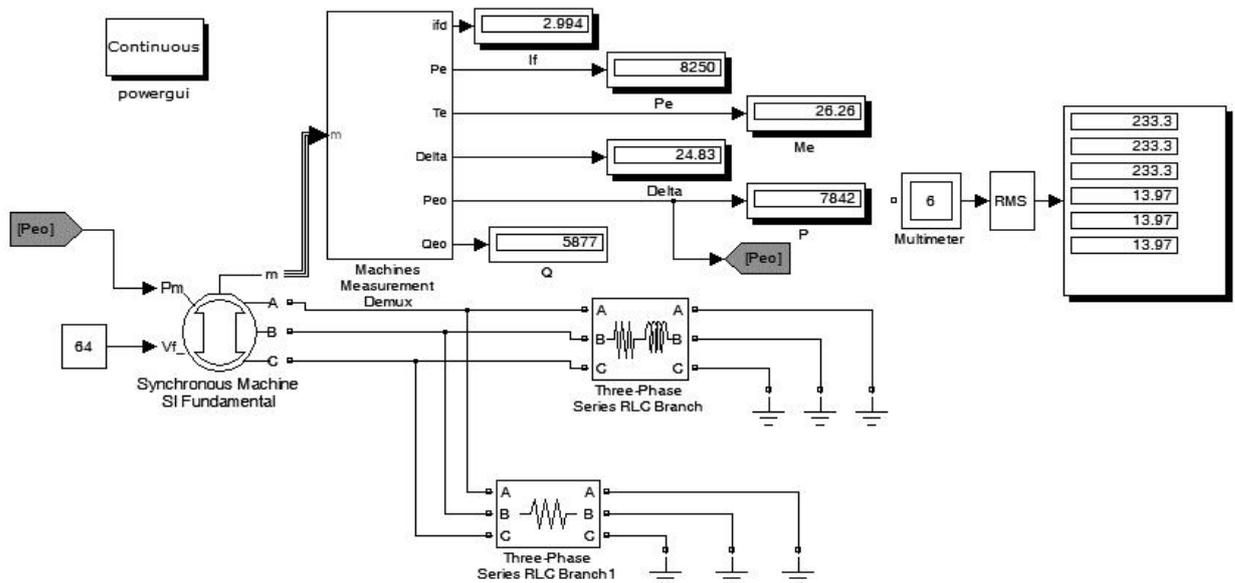


Рис. 3. Структурная схема модели синхронного генератора с активно-индуктивной нагрузкой

Результаты исследований

Первоочередная задача исследований состояла в оценке возможностей СГ по покрытию электрической нагрузки на долевых режимах ДГ и определению величины отклонения напряжения от номинального.

На рисунке 4 представлены предельная (кривая 1) и оптимальная (кривая 2) выходные мощности СГ на разных частотах вращения.

Характеристики построены в относительных единицах (за базисную принята номинальная мощность активной нагрузки $P_n=9,5$ кВт). Полученные характеристики позволяют оценить возможности генератора по степени использования $k_{ис} = P/P_n$ при различных частотах, при этом ограничениями являются номинальный ток возбуждения, номинальный ток обмотки статора и номинальное напряжение.

Кривая 1 характеризует максимальную активную мощность синхронного генератора в условиях обозначенных ограничений. Ограничением горизонтального участка кривой 1 служит величина напряжения, на наклонном участке кривая ограничена номинальным током обмотки возбуждения.

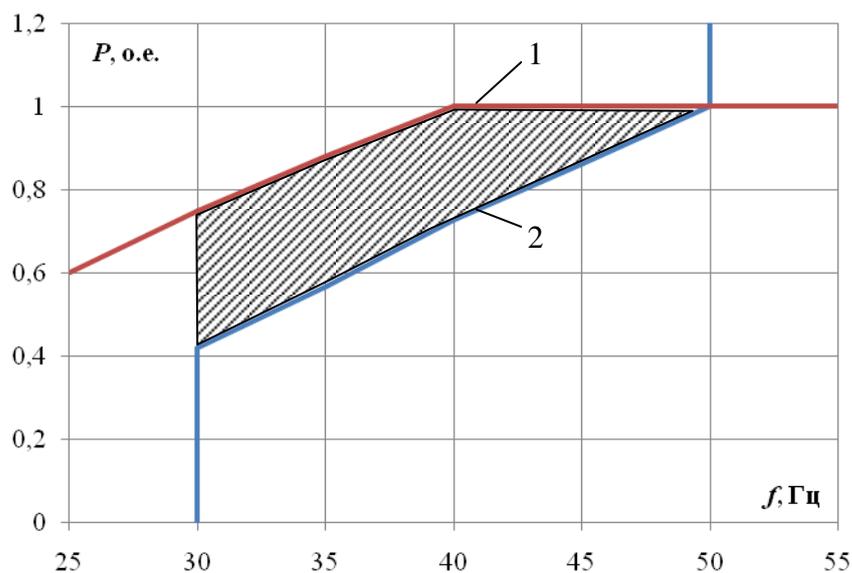


Рис.4. Предельная и оптимальная мощности СГ на разных частотах вращения

Следует отметить, что СГ в составе инверторной ДЭС работает исключительно на активную нагрузку, и соответственно, имеется небольшой «запас» по току возбуждения в отличие от ДЭС обычного типа, спроектированной на работу при $\cos\varphi=0,8$.

Снижение частоты вращения (наклонный участок кривой 1) приводит к существенному уменьшению ЭДС холостого хода, в то же время возможности регулирования напряжения ограничены тепловым режимом обмотки возбуждения. Так, при частоте $f=30$ Гц, номинальной величины напряжения невозможно достичь даже в режиме холостого хода.

Кривая 2 соответствует оптимальной загрузке СГ с точки зрения минимизации удельного расхода топлива ДГ. Из рисунка следует, что синхронный генератор при регулировании возбуждения обеспечивает требуемую мощность на всех рабочих частотах. При этом максимально возможное отклонение величины выходного напряжения (на частоте 30 Гц) от номинального не превышает 25 %. Возможная зона рабочих режимов СГ ограничена многоугольником, выделенным штриховкой.

Возможности управления рабочими режимами СГ на долевых нагрузках поясняет рисунок 5, на котором представлены внешние характеристики и зависимость мощности от тока нагрузки $P=f(I)$ при различных значениях тока возбуждения (кривые построены для частоты $f=40$ Гц).

Из рис. 5 следует, что требуемую загрузку генератора (оптимальный коэффициент использования $P/P_n=0,75$) можно обеспечить при разных значениях тока возбуждения (диапазон возможных рабочих режимов выделен пунктирными линиями), при этом выбор характеристики будет определять величину выходного напряжения и энергетические показатели генератора.

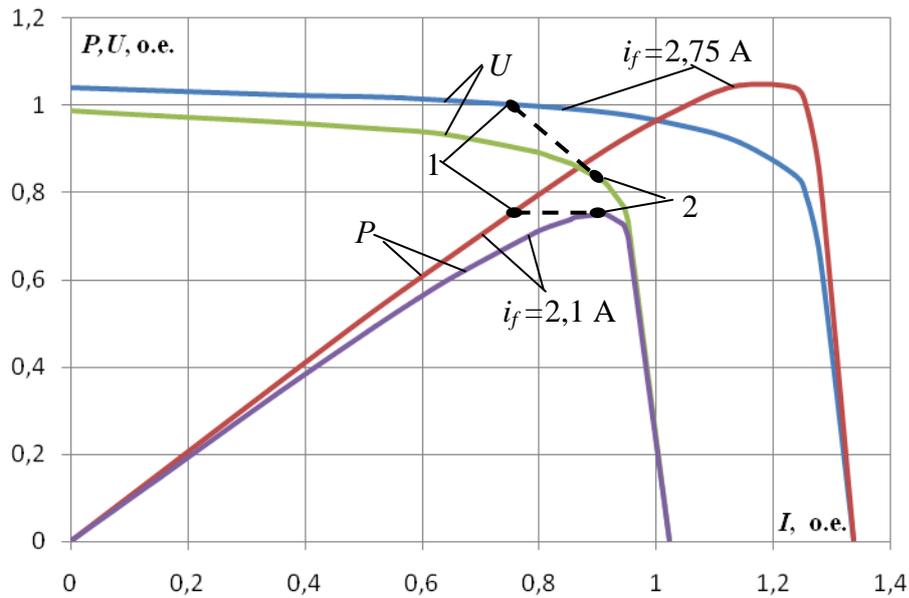


Рис. 5. Оценка возможных рабочих режимов СГ на частоте 40 Гц

Для оценки энергетических показателей синхронного генератора, работающего с переменной частотой, был проведен анализ потерь на возможных долевых режимах. Учитывались следующие виды потерь: потери на возбуждение, механические, магнитные потери, потери в обмотке якоря и добавочные потери от высших гармонических полей в стали статора и ротора. Суммарные потери при номинальной нагрузке $P_{\text{общ}}$ определены по значениям номинальной мощности и КПД.

Отдельные виды потерь рассчитываются по известным методикам [5]. Потери для генератора экспериментальной установки в номинальном режиме составили: электрические $P_{\text{эл}_H} = 394,15$ Вт (23,8 %), на возбуждение $P_{f_H} = 252$ Вт (15,2%), добавочные $P_{\text{доб}} = 95$ Вт (1%), механические $P_{\text{мех}_H} = 303$ Вт (18,3 %), в стали $P_{\text{ст}_H} = 615,85$ Вт (37,1%), суммарные $P_{\text{общ}} = 1660$ Вт (100 %).

При изменении частоты и напряжения потери в стали $P_{\text{ст}}$ и механические $P_{\text{мех}}$ пересчитываются по выражениям:

$$P_{\text{ст}} = P_{\text{ст}_H} \cdot \left(\frac{U}{U_H}\right)^2 \cdot \left(\frac{f}{f_H}\right)^{1,3} \quad (1)$$

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{мех}_н} \cdot \left(\frac{f}{f_n} \right)^3 \quad (2)$$

Кривые, представленные на рис.5, получены при следующих значениях тока возбуждения:

1. $i_f = 2,75 \text{ A}$;
2. $i_f = 2,1 \text{ A}$.

Ограничением для первого случая является величина выходного напряжения СГ $U=230 \text{ В}$, для второго – оптимальный коэффициент использования мощности генератора, который для данной частоты составляет 0,75.

Расчетные значения КПД при этом составили 0,86 и 0,875 (при величине напряжения $U=230 \text{ В}$ и $U=191,6 \text{ В}$) соответственно. Очевидно, что при структуре потерь, характерной для рассматриваемого генератора, более высокая энергетическая эффективность достигается при пониженном напряжении.

Однако с точки зрения устойчивости системы характеристики, соответствующие $i_f = 2,75 \text{ A}$, являются более предпочтительными. Кроме того, более высокая величина выходного напряжения в этом режиме предопределяет менее жесткие требования к схеме силового преобразовательного каскада.

Таким образом, для каждой частоты вращения генератора и его оптимальной загрузки существует вполне определенный узкий диапазон регулирования тока возбуждения, обеспечивающий устойчивость режима и хорошие энергетические показатели как электрической машины, так и силового преобразователя.

Выводы

1. Экспериментальные исследования показали, что оптимизация режимов работы дизельных электростанций за счет изменения частоты вращения синхронных генераторов при изменении величины нагрузки позволит обеспечить экономию топлива до 25 %.

2. Полученные с помощью математической модели генератора характеристики при его работе на автономную активную нагрузку позволяют сделать вывод, что диапазон регулирования возбуждения синхронного генератора достаточен для реализации оптимальных режимов работы инверторной дизельной электростанции.

При этом в диапазоне частот до 40 Гц возможно получение номинального напряжения. Предельно возможное напряжение для частот 35 и 30 Гц составляет 0,88 и 0,75 от номинальной величины напряжения соответственно.

3. Выбор рабочей точки внешней характеристики генератора, соответствующей режиму оптимальной загрузки, существенным образом не сказывается на КПД генератора.

4. Для обеспечения энергетически эффективных режимов работы СГ во всем рабочем диапазоне частот вращения необходима разработка специализированного регулятора возбуждения, позволяющего поддерживать выходное напряжение в заданных пределах.

5. Полученные результаты могут быть использованы для предварительной оценки возможностей синхронных генераторов ДЭС инверторного типа другого типоразмера аналогичного диапазона мощностей 10-100 кВт.

Список литературы

1. Б.В.Лукутин, Г.Н.Климова, С.Г.Обухов, Е.А.Шутов, Н.М.Парников. Формирование энергоэффективных режимов дизельной электростанции

инверторного типа // Известия вузов. Электромеханика, 2009, - № 6. - с.80-82

2. Chlodnicki Z., Koczara W., Al-Khayat N. Hybrid UPS Based on Supercapacitor Energy Storage and Adjustable Speed Generator // Journal Electric-al Power Quality and Utilisation, 2008, Vol. XIV, No.1, pp.13-24.
3. Leuchter J., Bauer P., Kurka O. Configuration for Mobile Electrical Power Source // The International Conference on Power Electronics, Intelligent Motion and Power Quality (PCIM EUROPE 2004), Nuremberg: PCIM Press, 2004, vol. 1, pp. 916-919.
4. Tolbert L.M., Peterson W.A., Scudiere M.B., White C.P., Theiss T.J., Andriulli J.B., Ayers C.W., Farquharson G., Ott G.W., Seiber L.E. Electronic Power Conversion System for an Advanced Mobile Generator Set // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Chicago, Illinois, September 30 - October 4, 2001, pp. 1763-1768.
5. Виноградов Н.В, Горяинов Ф.А., Сергеев П.С. Проектирование электрических машин / Под общей ред. Сергеева П.С. – Гос. Энергетическое из-во, М.-Л.Б 1950.