

УДК 621.313.322

СТАТИЧЕСКАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ РАБОТЫ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ АВТОНОМНО И НА СЕТЬ БЕСКОНЕЧНОЙ МОЩНОСТИ

Новогрецкий С.Н., ассистент

Национальный университет кораблестроения им. адмирала Макарова

54025, г. Николаев, пр. Героев Сталинграда, 9

E-mail: NGrek2005@yandex.ru

Розглянуто статичну стійкість паралельної роботи двох ідентичних синхронних генераторів на спільне навантаження. Показано, що статична стійкість відносного руху генераторів і стійкість роботи генератора на потужну мережу визначаються єдиним характеристичним рівнянням. Запропоновано при розгляді статичної стійкості систему з двох ідентичних синхронних генераторів і спільного навантаження замінити на дві еквівалентні: генератор – могутня мережа і генератор – половинне навантаження.

Ключові слова: синхронний генератор, статична стійкість.

The static stability of parallel work of two identical synchronous generators for general load is examined. It is shown that static stability of generators relative motion and stability of generator working on powerful system are defined united characteristic equation. When considering the static stability, the system from two identical synchronous generators and the general load are proposed to be substituted for two equivalents: generator – powerful system and generator – half load.

Key words: synchronous generator, static stability.

Введение. Синтез эффективного закона регулирования возбуждения целесообразно проводить по линеаризованным уравнениям элементов энергосистемы, то есть фактически на основе анализа поведения системы при малых отклонениях ее режимных параметров. Хотя такой подход не позволяет учесть все свойства исследуемой системы, однако дает возможность использовать теорию линейных систем автоматического регулирования [1, 2]. В общем случае эффективный закон регулирования должен быть универсальным и не зависеть от конфигурации системы, поэтому допустимо исследование упрощенных типовых схем, характерных для конкретных условий. Работа синхронных генераторов на мощную сеть в автономных электроэнергетических системах, к которым относятся и судовые, является не основным режимом [3], но наиболее простым с точки зрения математического описания. В [4] проведен анализ параллельной работы двух генераторов на общую нагрузку и работы одного генератора на мощную сеть. При количественном сопоставлении результатов показано, что статическая устойчивость в обоих режимах достигает максимума при одних и тех же значениях некоторых коэффициентов усиления обратных связей в канале регулирования возбуждения. Однако теоретического обоснования результаты не получили, и таким образом не могут считаться закономерными.

Цель работы. Определить взаимосвязь между режимами работы синхронного генератора на мощную сеть и параллельно с другим генератором на общую нагрузку.

Материал и результаты исследования. В соответствии с [1] уравнения Парка-Горева для синхронного генератора имеют следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}(e_{af} - x_d i_d) + x_q i_q \omega - r_a i_d &= \\ &= U_d = U \sin(\Theta); \\ -\frac{d}{dt}(x_q i_q) + (e_{af} - x_d i_d)\omega - r_a i_q &= \\ &= U_q = U \cos(\Theta); \\ T_{d0} \frac{d}{dt}(e_{af} - (x_d - x'_d) i_d) + e_{af} &= U_f; \\ T_j \frac{d\omega}{dt} + [(e_{af} - x_d i_d) i_q + x_q i_q i_d] &= M_m, \end{aligned} \right\} (1)$$

где M_m – механический момент, создаваемый приводным двигателем; все остальные параметры имеют общепринятые обозначения [1].

Напряжение возбуждения определяется системой возбуждения и в общем случае может быть представлено в виде функции режимных параметров:

$$U_f = f(i_d, i_q, e_{af}, U, \Theta, \omega). \quad (2)$$

Линеаризуем и представим в операторной форме уравнения (1) и (2):

$$\left. \begin{aligned} p(\delta e_{af} - x_d \delta i_d) + x_q i_{qn} \delta \omega + x_q \omega_n \delta i_q - \\ - r_a \delta i_d &= U_n \cos(\Theta_n) \delta \Theta + \sin(\Theta_n) \delta U; \\ -p x_q \delta i_q + (e_{afn} - x_d i_{dn}) \delta \omega + \omega_n \delta e_{af} - \\ - x_d \omega_n \delta i_d - r_a \delta i_q &= \cos(\Theta_n) \delta U - U_n \sin(\Theta_n) \delta \Theta; \\ (T_{d0} p + 1) \delta e_{af} - T_{d0} (x_d - x'_d) p \delta i_d &= \delta U_f; \\ T_j p \delta \omega + (e_{afn} - i_{dn} (x_d - x_q)) \delta i_q + \\ + (x_q - x_d) i_{qn} \delta i_d + i_{qn} \delta e_{af} - \delta M_m &= 0; \\ \delta U_f = k_\Theta \delta \Theta + k_q \delta i_q + k_d \delta i_d + k_e \delta e_{af} + \\ + k_u \delta U + k_\omega \delta \omega, \end{aligned} \right\} (3)$$

где k – эквивалентные коэффициенты усиления соответствующих обратных связей; индекс "н" указывает на соответствие данного параметра начальному установившемуся режиму, относительно которого рассматриваются малые колебания δ этих параметров.

При одиночной работе синхронного генератора на мощную сеть напряжение якоря можно считать величиной постоянной и соответственно вариацию равной нулю ($\delta U = 0$). В этом случае уравнения (3) примут вид:

$$\left. \begin{aligned} p(\delta e_{af} - x_d \delta i_d) + x_q i_{qn} \delta \omega + x_q \omega_n \delta i_q - \\ - r_a \delta i_d = U_n \cos(\Theta_n) \delta \Theta; \\ - p x_q \delta i_q + (e_{afn} - x_d i_{dn}) \delta \omega + \omega_n \delta e_{af} - \\ - x_d \omega_n \delta i_d - r_a \delta i_q = - U_n \sin(\Theta_n) \delta \Theta; \\ (T_{d0} p + 1) \delta e_{af} - T_{d0} (x_d - x'_d) p \delta i_d = \delta U_f; \\ T_j p \delta \omega + (e_{afn} - i_{dn} (x_d - x_q)) \delta i_q + \\ + (x_q - x_d) i_{qn} \delta i_d + i_{qn} \delta e_{af} - \delta M_m = 0; \\ \delta U_f = k_\Theta \delta \Theta + k_q \delta i_q + k_d \delta i_d + \\ + k_e \delta e_{af} + k_\omega \omega; \quad \delta \omega = p \delta \Theta. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

При автономной работе двух синхронных генераторов на единую нагрузку, к уравнениям генераторов (3) добавляются уравнения нагрузки с уравнениями связи, и анализ такой системы значительно усложняется.

Предположим, что оба синхронных генератора идентичны, имеют одинаковые системы возбуждения и механический момент изменяется по одному закону. В этом случае параметры исходного установившегося режима и уравнения генераторов в отклонениях будут абсолютно одинаковы, и если из уравнений одного вычесть соответствующие уравнения второго, то получим следующую систему:

$$\left. \begin{aligned} p(\delta e_{af12} - x_d \delta i_{d12}) + x_q i_{qn} \delta \omega_{12} + \\ + x_q \omega_n \delta i_{q12} - r_a \delta i_{d12} = U_n \cos(\Theta_n) \delta \Theta_{12}; \\ - p x_q \delta i_{q12} + (e_{afn} - x_d i_{dn}) \delta \omega_{12} + \omega_n \delta e_{af12} - \\ - x_d \omega_n \delta i_{d12} - r_a \delta i_q = - U_n \sin(\Theta_n) \delta \Theta_{12}; \\ (T_{d0} p + 1) \delta e_{af12} - T_{d0} (x_d - x'_d) p \delta i_{d12} = \delta U_{f12}; \\ T_j p \delta \omega_{12} + (e_{afn} - i_{dn} (x_d - x_q)) \delta i_{q12} + \\ + (x_q - x_d) i_{qn} \delta i_{d12} + i_{qn} \delta e_{af12} - \delta M_{m12} = 0; \\ \delta U_{f12} = k_\Theta \delta \Theta_{12} + k_q \delta i_{q12} + k_d \delta i_{d12} + \\ + k_e \delta e_{af12} + k_\omega \omega_{12}; \quad \delta \omega_{12} = p \delta \Theta_{12}, \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где индекс "12" указывает на разность отклонений соответствующих параметров первого и второго генератора (например, $\delta \omega_{12} = \delta \omega_1 - \delta \omega_2$).

Как мы видим, структура уравнений (4) и (5) идентична. Таким образом, анализ статической устойчивости работы синхронного генератора на мощную сеть и анализ относительной статической устойчивости двух одинаковых синхронных генераторов, работающих на общую нагрузку, проводится по единому характеристическому уравнению, что и объясняет результаты, полученные в [4].

Необходимо также отметить, что в систему (5) не входят параметры нагрузки. Кроме того, система содержит только относительные отклонения параметров генераторов. Это значит, что рассматриваются только взаимные колебания генераторов, а абсолютная устойчивость работы каждого генератора на общую нагрузку должна исследоваться отдельно.

Если просуммировать соответствующие уравнения генераторов и принять вариацию частоты в уравнениях нагрузки $\delta \omega = (\delta \omega_1 + \delta \omega_2)/2$, то с учетом уравнений нагрузки и уравнений связи получим систему идентичную по структуре системе уравнений для одиночной работы синхронного генератора на половинную нагрузку.

Таким образом, при рассмотрении статической устойчивости, систему из двух идентичных генераторных агрегатов, работающих на единую нагрузку, в первом приближении можно заменить двумя эквивалентными системами: генератор – мощная сеть и генератор – половинная нагрузка. В этом случае степень исследуемого характеристического уравнения резко снижается, что упрощает его исследование и синтез закона регулирования возбуждения.

Условие полной идентичности параллельно работающих генераторных агрегатов достаточно жесткое, однако в силу особенностей производства электроэнергии выполняется на многих судовых электростанциях. Хотелось бы также обратить внимание на отсутствие вариации напряжения в системе (5). Это говорит о том, что обратная связь по напряжению в цепи регулирования возбуждения мало влияет на относительную устойчивость параллельной работы идентичных генераторных агрегатов.

В качестве примера рассмотрим работу на статическую активно-индуктивную нагрузку двух синхронных генераторов, имеющих следующие параметры: $r_a = 0,0133$ о.е.; $x_d = 2,053$ о.е.; $x_q = 1$ о.е.; $x'_d = 0,213$ о.е.; $T_{d0} = 1100$ рад.; $T_j = 2000$ рад. Предположим, что механический момент и напряжение возбуждения изменяются по следующим законам:

$$\begin{aligned} & - \text{механический момент} \\ & M_m = 20(\omega_{xx} - \omega), \text{ о.е.}; \\ & - \text{напряжение возбуждения} \end{aligned}$$

$$U_f = U_{fxx} + k_u (U_3 - U) + k'_\omega \frac{d\omega}{dt},$$

где U_{fxx} и ω_{xx} – напряжение возбуждения и частота вращения на холостом ходу; U_3 – заданное напряжение якоря генератора.

В отклонениях и в операторной форме имеем:

$$\delta M_m = -20 \delta \omega; \quad \delta U_f = -k_u \delta U + k'_\omega p \delta \omega. \quad (6)$$

Для исследования в качестве начального установившегося режима выберем номинальную нагрузку генератора. Предположим, что не зависимо от значений коэффициентов усиления обратных связей в канале регулирования возбуждения, начальный режим определяется следующими параметрами:

$$\begin{aligned} \sin(\Theta_n) &= 0,447; \quad \cos(\Theta_n) = 0,895; \quad i_{dn} = 0,895 \text{ о.е.}; \\ i_{qn} &= 0,447 \text{ о.е.}; \quad e_{afn} = 2,73 \text{ о.е.}; \quad \omega_n = 1 \text{ о.е.}; \quad U_n = 1 \text{ о.е.} \end{aligned}$$

1. Статическая устойчивость работы генератора на мощную сеть.

Уравнения системы в отклонениях, пренебрегая переходными процессами в цепи якоря и активным сопротивлением якоря:

$$\left. \begin{aligned} x_q i_{qH} \delta\omega + x_q \omega_H \delta i_q &= U_H \cos(\Theta_H) \delta\Theta; \\ (e_{afH} - x_d i_{dH}) \delta\omega + \omega_H \delta e_{af} - x_d \omega_H \delta i_d &= \\ &= -U_H \sin(\Theta_H) \delta\Theta; \\ (T_{d0} p + 1) \delta e_{af} - T_{d0} (x_d - x'_d) p \delta i_d &= \delta U_f; \\ T_j p \delta\omega + (e_{afH} - i_{dH} (x_d - x_q)) \delta i_q + \\ + (x_q - x_d) i_{qH} \delta i_d + i_{qH} \delta e_{af} + k_\omega \delta\omega &= 0; \\ \delta U_f = k'_\omega p \delta\omega; \quad \delta\omega = p \delta\Theta. \end{aligned} \right\}$$

Характеристическое уравнение системы при принятых начальных условиях:

$$468600p^3 + (8950 + 0,447 \cdot k'_\omega) p^2 + 586,8p + 3,0741 = 0. \quad (6)$$

Для определения k'_ω можно воспользоваться D-разбиением или построением в зависимости от k'_ω степени статической устойчивости η , под которой понимается наибольшая действительная часть корней характеристического уравнения.

Результаты расчета зависимости $\eta(k'_\omega)$, представленные на рис. 1, позволяют определить k'_ω , соответствующий наибольшей степени устойчивости:

$$k'_{\omega max} = 54000 \text{ о.е.} = 0,547 U_{fxx} \cdot c^2 / \text{рад.}$$

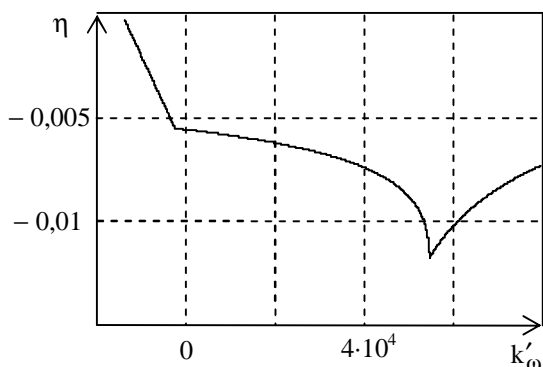


Рисунок 1 – Зависимость $\eta = f(k'_\omega)$

2. Статическая устойчивость работы генератора на статическую активно-индуктивную нагрузку.

Уравнения статической активно-индуктивной нагрузки можно записать следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} U_d = r_H i_d + x_H \frac{d}{dt} i_d - x_H i_q \omega; \\ U_q = r_H i_q + x_H \frac{d}{dt} i_q + x_H i_d \omega, \end{aligned} \right\}$$

где x_H и r_H – индуктивное и активное сопротивление нагрузки (в рассматриваемом режиме $x_H = 0,6$ о.е. и $r_H = 0,8$ о.е.).

Уравнения системы в отклонениях, пренебрегая активным сопротивлением якоря, а также переходными процессами в якоря и нагрузке:

$$\left. \begin{aligned} -x_H i_{qH} \delta\omega - x_H \omega_H \delta i_q + r_H \delta i_d &= \\ = U_H \cos(\Theta_H) \delta\Theta + \sin(\Theta_H) \delta U; \\ x_H i_{dH} \delta\omega + x_H \omega_H \delta i_d + r_H \delta i_q &= \\ = \cos(\Theta_H) \delta U - U_H \sin(\Theta_H) \delta\Theta; \\ x_q i_{qH} \delta\omega + x_q \omega_H \delta i_q &= \\ = U_H \cos(\Theta_H) \delta\Theta + \sin(\Theta_H) \delta U; \\ (e_{afH} - x_d i_{dH}) \delta\omega + \omega_H \delta e_{af} - x_d \omega_H \delta i_d &= \\ = \cos(\Theta_H) \delta U - U_H \sin(\Theta_H) \delta\Theta; \\ (T_{d0} p + 1) \delta e_{af} - T_{d0} (x_d - x'_d) p \delta i_d &= \delta U_f; \\ T_j p \delta\omega + (e_{afH} - i_{dH} (x_d - x_q)) \delta i_q + \\ + (x_q - x_d) i_{qH} \delta i_d + i_{qH} \delta e_{af} + k_\omega \delta\omega &= 0; \\ \delta U_f = -k_u \delta U + k'_\omega p \delta\omega. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Характеристическое уравнение представленной системы:

$$a_2 p^2 + a_1 p + a_0 = 0, \quad (8)$$

где $a_2 = 4273321$; $a_1 = 3579,2 \cdot k_u + 52368,4 + 2,8628 \cdot k'_\omega$; $a_0 = 33,332 \cdot k_u + 94,354$.

На рис. 2 показаны результаты расчета степени статической устойчивости в зависимости от коэффициента k_u .

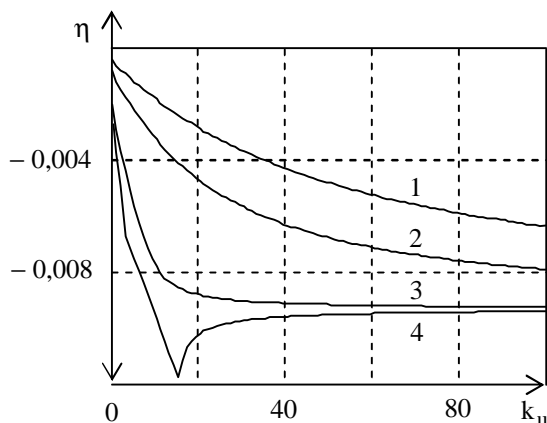


Рисунок 2 – Зависимость $\eta = f(k_u)$:
1 – $k'_\omega = 54000$ о.е.; 2 – $k'_\omega = 20000$ о.е.;
3 – $k'_\omega = 0$; 4 – $k'_\omega = -2000$ о.е.

Как следует из графиков, в отличие от случая работы генератора на мощную сеть введение положительной обратной связи по производной частоты вращения уменьшает степень устойчивости системы. В то же время введение отрицательной обратной связи по производной частоты вращения, как и увеличение отрицательной обратной связи по отклонению напряжения якоря повышает устойчивость системы.

3. Статическая устойчивость параллельной работы двух идентичных синхронных генераторов на статическую активно-индуктивную нагрузку.

Для описания исследуемой системы к системе уравнений (7) необходимо добавить уравнения второго генератора и уравнения связи. Так как оба генератора по условию работают в одинаковых исходных установившихся режимах, то $\Theta_{1H} - \Theta_{2H} = 0$.

Вследствие чего уравнения связи примут следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} i_{d2} \cos(\Theta_{12}) + i_{q2} \sin(\Theta_{12}) + i_{d1} &= i_d; \\ i_{q2} \cos(\Theta_{12}) - i_{d2} \sin(\Theta_{12}) + i_{q1} &= i_q; \\ \omega_1 - \omega_2 = \omega_{12} = \frac{d}{dt}(\Theta_1 - \Theta_2) &= \frac{d}{dt}\Theta_{12}, \end{aligned} \right\}$$

или те же уравнения в отклонениях

$$\left. \begin{aligned} \delta i_{d2} + i_{q2n} \delta \Theta_{12} + \delta i_{d1} &= \delta i_d; \\ \delta i_{q2} - i_{d2n} \delta \Theta_{12} + \delta i_{q1} &= \delta i_q; \delta \omega_{12} = \frac{d}{dt} \delta \Theta_{12}, \end{aligned} \right\}$$

где i_d и i_q – проекции тока нагрузки на оси d , q первого генератора; индексы "1" и "2" указывают на принадлежность этих параметров первому и второму генератору соответственно.

Так как уравнения записаны в относительных единицах первого генератора, то номинальному режиму соответствует $x_n = 0,3$ о.е. и $r_n = 0,4$ о.е.

Характеристическое уравнение системы:

$$b_5 p^5 + b_4 p^4 + b_3 p^3 + b_2 p^2 + b_1 p + b_0 = 0, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} b_5 &= 2002478 \cdot 10^6; \\ b_4 &= 1677 \cdot 10^6 \cdot k_u + 62787 \cdot 10^6 + 3251700 \cdot k'_\omega \\ b_3 &= 1599,9 \cdot k_u k'_\omega + 47653974 \cdot k_u + \\ &+ 49031,6 \cdot k'_\omega + 1,279688 \cdot k_\omega^2 + 3020607237; \\ b_2 &= 14,8995 \cdot k_u k'_\omega + 2398689 \cdot k_u + \\ &+ 1722,16 \cdot k'_\omega + 44712270; \\ b_1 &= 30563,1 \cdot k_u + 8,80075 \cdot k'_\omega + 216356,8; \\ b_0 &= 102,468 \cdot k_u + 290,0577. \end{aligned}$$

На рис. 3 представлены результаты расчета зависимости $\eta = f(k_u)$ для трех исследуемых систем ($k'_\omega = 20000$ о.е.). Как видно из графиков, зависимость $\eta = f(k_u)$ при параллельной работе двух генераторов на нагрузку с достаточной степенью точности может быть получена путем объединения соответствующих зависимостей при одиночной работе генератора на нагрузку и при параллельной работе генератора на мощную сеть. Более того, если перемножить уравнения (6) и (8), то получим уравнение пятого порядка, коэффициенты которого незначительно будут отличаться от коэффициентов характеристического уравнения (9).

Что же касается регулятора возбуждения, то в соответствии с рис. 3 степень статической устойчивости достигает своего максимума при коэффициенте $k_u > 38$ о.е., который в дальнейшем выбирается из возможности технической реализации и обеспечения необходимого статизма внешней характеристики генератора.

В заключение отметим, что целью произведенных расчетов было наглядно показать возможность значительного упрощения анализа статической устойчивости и синтеза регулятора возбуждения при параллельной работе двух идентичных синхронных генераторов на общую нагрузку. Поэтому в примере

были приняты допущений (пренебрежение переходными процессами в обмотках якоря генератора, а также инерционностью регуляторов возбуждения и скорости вращения), которые повлияли на численный результат, но позволили значительно уменьшить степень исследуемых характеристических уравнений. В то же время на качественную сторону рассматриваемого вопроса это не оказало значительного влияния.

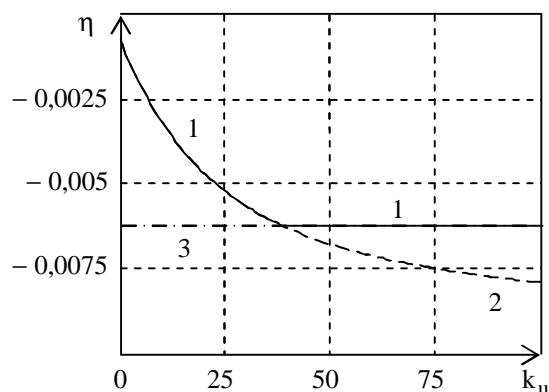


Рисунок 3 – Зависимость $\eta = f(k_u)$:

- 1 – при параллельной работе двух генераторов на общую нагрузку; 2 – при одиночной работе генератора на половинную нагрузку; 3 – при работе генератора на мощную сеть

Выводы.

1. Анализ статической устойчивости работы синхронного генератора на мощную сеть и анализ относительной статической устойчивости двух полностью идентичных синхронных генераторов, работающих на общую нагрузку, проводится по единому характеристическому уравнению.

2. При рассмотрении статической устойчивости систему из двух идентичных генераторных агрегатов, работающих на единую нагрузку, в первом приближении можно заменить двумя эквивалентными: системой генератор – мощная сеть и системой генератор – половинная нагрузка.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ДАННЫЕ

1. Веретенников Л.П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. –Л.: Судостроение, 1975. – 376 с.
2. Абдул-Заде В.М., Алиев Д.Г., Гусейнов А.М. Выбор настроек АРВ генераторов по результатам анализа статической устойчивости энергосистемы // Электричество, 1990. – №3. – С. 54-58.
3. Коваленко В.П. Автоматическое регулирование возбуждения и устойчивость судовых синхронных генераторов. – Л.: Судостроение, 1976. – 272 с.
4. Новогрецкий С.Н. Статическая устойчивость параллельной работы двух скомпенсированных синхронных генераторов // Збірник наукових праць. – М.: НУК, 2006. – №2(407). – С. 130-136.

Стаття надійшла 10.04.2007 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., проф.
Родькіним Д.Й.