

кой отрасли Украины является техническое перевооружение и доведение технического и технологического состояния оборудования до европейских стандартов.

4. В случае осуществления проектов по перевооружению отрасли с использованием иностранных инвестиций возникают проблемы, связанные с отстранением отечественных специалистов, перераспределением кредитов в пользу иностранных компаний и др.

5. Пример модернизации котельной в когенерационную станцию «Южная» (в г. Запорожье) продемонстрировал и подтвердил существование эффективных способов технического перевооружения энергетической отрасли «собственными» отечественными предприятиями.

6. Несовременное законодательство не способствует заинтересованности предприятий в энергосбережении и экологической защите.

Перечень ссылок

1. Шеберстов О. М Стан теплових електростанцій України, перспективи їх оновлення і модернізації / / Енергетика і електрифікація – 2004. № 12 [Цит. 2005, 10 февраля] – Доступный с: www.mpe.kmu.gov.ua/.../publish/
2. Сыроватка С. Правительство определило модель модернизации ТЭС // Деловая столица – 3–4, 2004. – 1–26. Доступный с: <http://www.dsnews.ua/economy/art12913.html>

3. Марциняк М. В Развитие технологии ЦКС. // О конференции: «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития» – 2004, 24–30 сентября, г. Алушта. Доступный с: http://www.triacon.org/Events/Coal2004/index_ru.htm
4. Торжественное открытие реконструированного энергоблока Змиевской ТЭС сорвалось // Электроэнергия – 2002. № 12 [Цит. 2002, 21 декабря] – Доступный с: info@deco.com.ua
5. Грищенко А. Никакой наркобизнес не дает такой прибыли, сколько дает грамотное использование научных достижений // STATUS QUO – [Цит. 2004, 24 февраля] – Доступный с: http://sq.com.ua/show_article/90/index.html
6. Сябер Н. А. Реконструкция блока № 8 Змиевской ТЭС // О конференции: «Угольная теплоэнергетика: проблемы реабилитации и развития» – 2004, 24–30 сентября, г. Алушта. Доступный с: http://www.triacon.org/Events/Coal2004/index_ru.htm
7. Журавлев А. Скачок приведет к прорыву // Новое слово – [Цит. 2001, 3 декабря] – Доступный с: http://www.rassvet.zp.ua/press_ukr.html
8. 5000 Мегаватт // Содружество – 2006. – № 1 (38). – С. 10–11. – Доступный с: http://www.rassvet.zp.ua/press_ukr.html
9. Громов И. Трубу – к ветку! // Миг – 2006. – № 3. – С. 8.

Поступила в редакцию 12. 01. 08 г.

После доработки 28. 05. 08 г.

Через зіставлення технічних і економічних характеристик проектів по переозброєнню теплоенергетичних потужностей аналізується досвід вітчизняних підприємств в рішенні актуальних проблем підвищення ефективності роботи підприємств ПЕК.

Through a comparing the technical and economic parameters of projects connected with a reequipment of heat power capacities is suggested to study and analyze an experience of the domestic enterprises in order to decide the actual problems how to increase an efficiency in the activity of heat power enterprise of Ukraine.

УДК 621.313.322

Л. Н. Канов

Оценка степени несинусоидальности формы напряжения в автономной электроэнергетической системе с использованием метода имитационного моделирования

Предложена основанная на имитационном моделировании методика численного определения коэффициента несинусоидальности напряжения синхронного генератора при импульсном возбуждении. Разработаны имитационные модели генератора со статической активно-индуктивной и асинхронной двигательной нагрузками, для которых выполнены расчеты коэффициента несинусоидальности.

Введение

Качество электроэнергии определяется совокупностью параметров, описывающих особенности про-

© Л. Н. Канов 2008 р.

цесса производства и передачи энергии и характеризующих напряжение в электроэнергетической системе. Привлечение внимания к качеству электроэнергии обусловлено тем, что искажение формы напря-

жения отрицательно действует на электрооборудование, вызывает ложные срабатывания элементов систем управления и защиты, сокращает сроки службы изоляции электрооборудования. Например, в США ежегодные убытки из-за несинусоидальности напряжения согласно данным [1] оцениваются миллиардами долларов. Применение импульсных схем возбуждения увеличивает интерес к их влиянию на форму выходного напряжения синхронных генераторов, так как при этом в электроэнергетической системе возникают дополнительные потери энергии [2]. Особенно актуальны эти вопросы в автономных электроэнергетических системах, когда суммарная мощность системы и мощность единичного источника являются одного порядка (например, в бортовых системах) [3].

Несинусоидальное напряжение характеризуется коэффициентом несинусоидальности кривой напряжения, который определяется отношением действующего значения напряжения к действующему значению напряжения основной гармоники.

$$k_U = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} U_i^2}}{U_1} = \sqrt{\left(\frac{U}{U_1}\right)^2 - 1}, \quad (1)$$

где U, U_1, U_i – действующее значение напряжения в системе, действующие значения напряжения основной и высших гармоник соответственно. В работе [4] систематизированы и описаны все аспекты проблемы влияния высших гармоник на различные виды электрооборудования. Сравнительно меньшее внимание уделяется методике расчета искажения формы напряжения и оценке влияния режима возбуждения и параметров синхронных генераторов на коэффициент несинусоидальности k_U .

Основу существующих способов расчета данного коэффициента k_U составляют уравнения автономного синхронного генератора, которые в общепринятых обозначениях имеют вид [5]:

$$\left. \begin{aligned} -u_d &= r_i i_d - i_q x_q + \frac{d\psi_d}{dt}; \\ -u_q &= r_i i_q + \psi_d + x_q \frac{di_q}{dt}; \\ u_f &= r_f i_f + \frac{d\psi_f}{dt}; \\ 0 &= r_{kd} i_{kd} + \frac{d\psi_{kd}}{dt}; \\ \psi_d &= x_d i_d + x_{ad} (i_f + i_{kd}); \\ \psi_f &= x_f i_f + x_{ad} (i_f + i_{kd}); \\ \psi_{kd} &= x_{kd} i_{kd} + x_{ad} (i_f + i_{kd}). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

При заведомо заданной нагрузке с использова-

нием преобразования Лапласа из этих уравнений можно получить изображения составляющих выходного напряжения для любой формы напряжения возбуждения. Существенное затруднение при этом состоит в получении в явном виде решения для составляющих напряжения на нагрузке (даже при сравнительно простой форме напряжения возбуждения). Для этого применяются упрощающие предположения, приводящие к определению приближенного значения k_U . Развитию этого направления посвящена работа [6], однако в ней напряжение возбуждения заранее задается в виде гармонической функции определенной частоты, а для получения достаточного значения k_U требуются громоздкие расчеты. В работе [7] исследован характер влияния параметров импульсного регулирования (в частности, коэффициента форсировки и длительности импульса возбуждения) на выходное напряжение синхронного генератора, но при этом не разработан способ расчета коэффициента несинусоидальности k_U .

Определенные возможности для исследования качества выходного напряжения генераторов предоставляет имитационное моделирование. В пакете программ MatLab Simulink и в библиотеках Power System blockset имеются средства моделирования синхронных генераторов, которые при определенной настройке позволяют получить стационарный режим генератора при различных видах возбуждения. Для визуального исследования спектрального состава напряжения применяется спектрограмма [8]. При этом, ввиду учета ограниченного числа гармоник, также затруднительно получение точного значения коэффициента k_U . Кроме того, моделирование стационарного режима генератора с помощью имитационной модели в пакете Simulink накладывает ограничение на нагрузку генератора (что, в частности, не позволяет применить эту модель для исследования формы напряжения в режиме холостого хода).

Целью статьи является разработка методики применения имитационного моделирования для исследования кривой выходного напряжения и численного расчета коэффициента несинусоидальности k_U автономного синхронного генератора при различных видах импульсного возбуждения.

Материалы исследований

Преобразуем выражение (1) для k_U к следующему виду, в котором действующие значения напряжения и его первой гармоники вычисляются непосредственно через мгновенное значение напряжения $u(t)$ в виде:

$$k_U^2 = \frac{T \int_0^T u^2(t) dt}{2 \left(\int_0^T u(t) \sin t dt \right)^2 + \left(\int_0^T u(t) \cos t dt \right)^2} - 1, \quad (3)$$

$$u(t) = u_d(t) \cos t - u_q(t) \sin t,$$

где интеграл в числителе объясняется необходимостью вычисления действительного значения напряжения, а в знаменателе – действующего значения первой гармоники; $u_d(t)$, $u_q(t)$ – соответственно напряжения продольной и поперечной составляющих синхронного генератора.

Введем сопротивление рассеяния обмотки возбуждения $x_{\sigma f}$, продольной демпфирующей обмотки $x_{\sigma kd}$ и обмотки фазы статора $x_{\sigma d}$ и перепишем уравнения (2) генератора для резистивно-индуктивной нагрузки $r_H - x_H$:

$$\left. \begin{aligned} u_d + r i_d + x_{\sigma d} \frac{di_d}{dt} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt} - x_q i_q &= 0; \\ u_q + r i_q + x_{\sigma d} i_d + x_q \frac{di_q}{dt} + \psi_{\delta d} &= 0; \\ u_f = r_f i_f + x_{\sigma f} \frac{di_f}{dt} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}; \\ 0 = r_{kd} i_{kd} + x_{\sigma kd} \frac{di_{kd}}{dt} + \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}; \\ u_d = r_H i_d + x_H \frac{di_d}{dt} - x_H i_q; \\ u_q = r_H i_q + x_H \frac{di_q}{dt} + x_H i_d \end{aligned} \right\} (4)$$

Здесь потокосцепление в зазоре $\psi_{\delta d}$ по продольной оси вследствие насыщения магнитной цепи нелинейно зависит от намагничивающего тока $i_{\delta d} = i_d + i_f + i_{kd}$. Точное аналитическое решение этих уравнений невозможно, поэтому для исследования режима генератора предлагается применить имитационное моделирование.

Построению электрических аналогов различных механических, тепловых, акустических и иных систем посвящено немало работ, в том числе и – имитацион-

ному моделированию электрических машин [5, 8, 9]. Имитационное моделирование заключается в численном исследовании схемных моделей с помощью существующих программных средств расчета электрических цепей (например, Electronics Workbench, Colo [10] и др.). В работах [11, 12] предложены и обоснованы параллельные схемные модели синхронного генератора и асинхронного двигателя во вращающихся dq – координатах, предназначенные для анализа автономных электроэнергетических систем. Их отличительной особенностью является небольшое (например, по сравнению с моделями в Simulink) количество узлов и управляемых источников, что облегчает процесс моделирования. Также для этих моделей предоставляет определенную гибкость и удобство их сопряжения с моделями нагрузок, приводных двигателей и других элементов электротехнических систем.

Подобная имитационная модель генератора для резистивно-индуктивной нагрузки, соответствующая уравнениям (4), изображена на рис. 1. Проводимости: $g1 = g4$ и $g2 = g3$ численно равны обратным значениям активных сопротивлений фазы нагрузки r_H и фазы статора r ; проводимости $g5, g6$ – равны обратным значениям активных сопротивлений обмотки возбуждения r_f и продольной демпфирующей обмотки r_{kd} . Емкости $C1 = C4$ задают численные значения реактивного сопротивления нагрузки x_H ; емкость $C3$ – задает поперечную реактивность x_q генератора. Реактивные сопротивления рассеяния $x_{\sigma d}, x_{\sigma kd}, x_{\sigma f}$ задаются емкостями $C2, C6, C5$. С помощью единичной индуктивности L задается производная от продольного потокосцепления в зазоре $\psi_{\delta d}$, которое имитируется управляемым источником тока $J4$ в соответствии с его нелинейной зависимостью от тока $i_{\delta d}$. Линейные управляемые источники тока $J1-J3, J5, J6$ реализуют соотношения соответ-

ственно $x_H i_q, x_q i_q, 1 \cdot \frac{d\psi_{\delta d}}{dt}, x_{\sigma d} i_d, x_H i_d$. Значе-

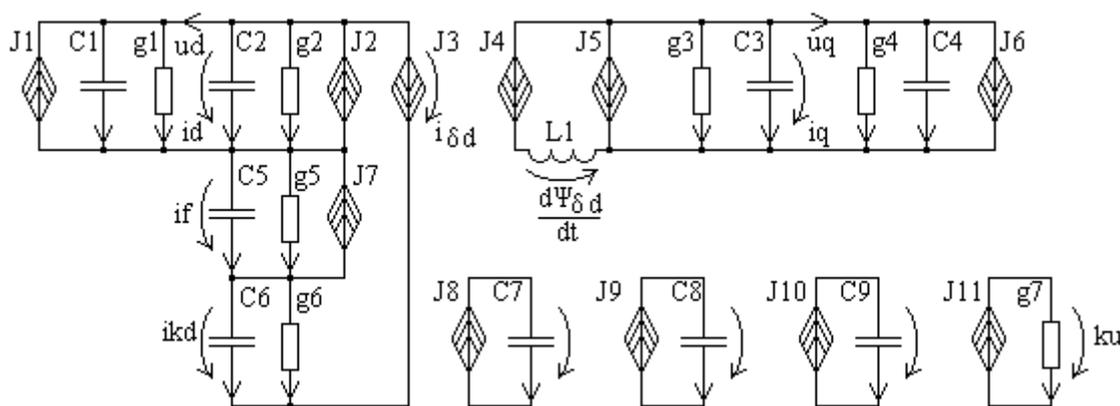


Рис. 1. Параллельная имитационная модель генератора для резистивно-индуктивной нагрузки

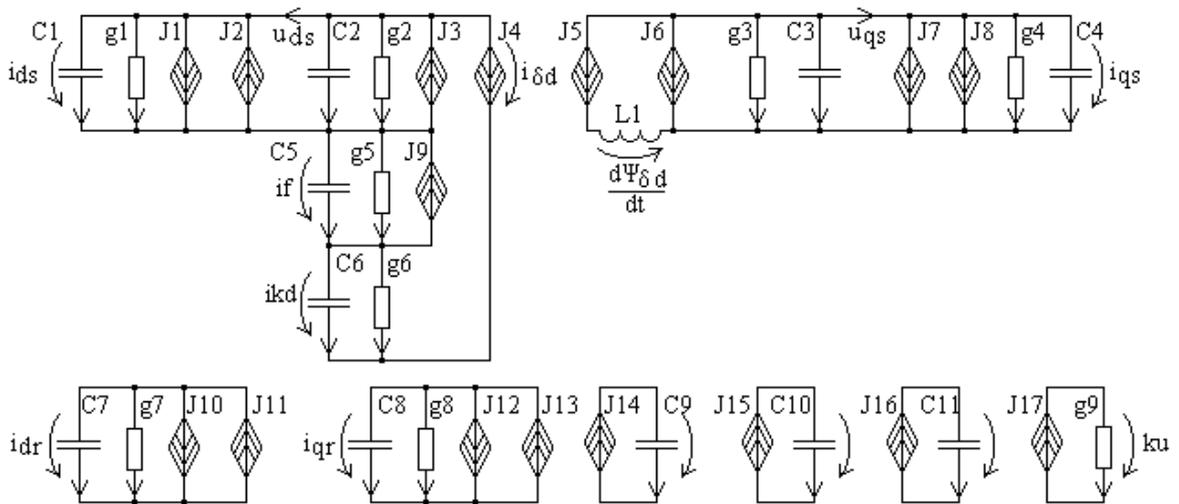


Рис. 2. Имитационная модель системы СГ–АД

ние тока для источника $J7$ численно равно напряжению возбуждения u_f . Эта часть модели производит решение системы (4): напряжения на емкостях $C2, C3$ численно равны составляющим тока статора; напряжение на емкости $C5$ – току возбуждения; на емкости $C6$ – току в продольной демпфирующей обмотке. Составляющие напряжения u_d, u_q численно равны токам, обозначенным в верхней части рисунка. Небольшое количество узлов и управляемых источников и минимальное время интегрирования (один период) не приводит к заметной расходимости вычислительного процесса.

Вспомогательные контуры $J8 - C7, J9 - C8, J10 - C9$ представляют интеграторы с единичными емкостями и нулевыми начальными условиями для расчета интегралов в выражении (3). Токи для источников $J8 - J10$ в этих контурах численно равны выражениям подинтегральных функций в (3) соответственно:

$$u^2(t) = (u_d \cos t - u_q \sin t)^2, u(t) \sin t, u(t) \cos t. \quad (5)$$

Источник $J11$ вычисляет коэффициент несинусоидальности, который численно равен напряжению на единичной проводимости $g7$ в момент окончания процесса моделирования. В режиме холостого хода имитационная модель упрощается за счет исключения емкостей $C1...C4$, проводимостей $g1...g4$ и управляемых источников тока $J1, J2, J5, J6$.

На рис. 2 изображена имитационная модель системы, состоящей из рассматриваемого генератора и включенного к нему асинхронного двигателя соизмеримой мощности. На этом рисунке помимо уже описанных элементов схемной модели генератора с интегрирующими контурами $C9...C11, J14...J16$ и контура $J17, g9$ для вычисления k_U обозначены элементы схемной модели двигателя. Проводимости $g1 = g4$ и $g7 = g8$ численно равны обратным значениям

активных сопротивлений фазы статора r_s и ротора r_r ; емкости $C1 = C4$ и $C7 = C8$ – задают реактивные сопротивления статора x_s и ротора x_r . Источники $J1, J8, J10, J12$ управляются производными токов статора и ротора с коэффициентом x_m и численно равны

$$\text{соответственно: } x_m \frac{di_{dr}}{dt}, x_m \frac{di_{qr}}{dt}, x_m \frac{di_{ds}}{dt}, x_m \frac{di_{qs}}{dt}.$$

Источники $J2, J7$ определяются суммами составляющих токов: $x_s i_{qs} + x_m i_{qr}$ и $x_s i_{ds} + x_m i_{dr}$. И, наконец, значения токов для источников $J11, J13$ численно равны: $(1 - \omega_r)(x_r i_{qr} + x_m i_{qs})$ и $(1 - \omega_r)(x_r i_{dr} + x_m i_{ds})$. Интересующие нас составляющие напряжения на выводах генератора u_{ds}, u_{qs} численно равны токам, обозначенным в верхней части рисунка.

Для расчета коэффициента несинусоидальности k_U представленные имитационные модели необходимо ввести в стационарный режим. Такой режим может быть достигнут путем их расчета на длительном интервале времени, что потребует больших вычислительных ресурсов и приведет к потере точности. Поэтому возникает задача определения таких начальных напряжений на емкостях моделей, которые сразу бы обусловили установившийся режим. Эта задача решается с помощью процедуры минимизации суммы квадратов разностей между соответствующими значениями напряжений в начале и в конце периода промышленной частоты.

Анализ результатов

Для примера рассмотрим стационарный режим генератора МС117-4 мощностью 125 кВА со следующими параметрами в относительных единицах [13]:

$$x_d = 1,25; \quad x_{ad} = 1,2; \quad x_q = 0,7; \quad x_f = 1,638; \\ x_{kd} = 1,226; \quad r_{kd} = 0,04 \text{ для активно-индуктивной нагрузки } r_H = x_H = 0,7 \text{ при возбуждении прямоу-}$$

гольными импульсами амплитудой 0,5 о. е. и частотой 300 Гц. На рис. 3 изображены напряжения и токи для этого режима, рассчитанные по имитационной модели на рис. 1 с точностью $\varepsilon = 0,05\%$. На графиках на рис. 3 видны искажения продольной составляющей напряжения, соответствующие импульсам напряжения возбуждения; заметны они и в кривой фазного напряжения (на рисунке изображено лишь одно фазное напряжение). Рассчитанный коэффициент несинусоидальности здесь составляет 1,65 %. Для сравнения на рис. 4 изображены кривые, соответствующие режиму холостого хода этого генератора, которые показывают наличие существенных импульсных искажений в фазных напряжениях. Эти искажения более ярко проявляются вблизи перехода графиков через ноль, что объясняется влиянием насыщения магнитной цепи. Вычисленный коэффициент искажения здесь составляет 2,85 %. Таким образом, при малых нагрузках искажения выходного напряжения генератора проявляются более заметно. Кроме того, подобные же исследования показали снижение коэффициента несинусоидальности с ростом частоты и с соответствующим снижением амплитуды импульсов возбуждения.

В качестве другого примера рассмотрим искажения напряжения в системе генератор-двигатель, имитационная модель которой изображена на рис. 2. Здесь выбран двигатель МАФ82-82/4 мощностью 50 кВт с приведенными к генератору параметрами (в о. е.): $r_s = 0,214$; $r_r = 0,106$; $x_m = 23,9$; $x_s = 24,49$; $x_r = 24,81$. На

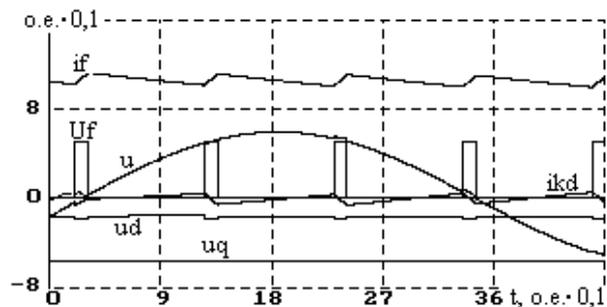


Рис. 3. Стационарный режим генератора с импульсным возбуждением для резистивно-индуктивной нагрузки

обмотку возбуждения генератора подается его выходное напряжение после тиристорного выпрямителя (с углом отпирания тиристоров, равным 1,31 радиана, и с коэффициентом трансформации, равным 0,3). Рассчитанные кривые напряжений и токов для этого режима изображены на рис. 5. Искажения фазного напряжения составляют 1,20 %. Таким образом, асинхронная нагрузка способствует улучшению формы напряжения даже при самовозбуждении и при низкой частоте импульсов обмотки возбуждения (равной 150 Гц). Для сравнения на рис. 6 изображены кривые для режима холостого хода этого генератора с рассматриваемым режимом самовозбуждения. Графики показывают значительные искажения фазных напряжений; коэффициент несинусоидальности составляет 4,65 %.

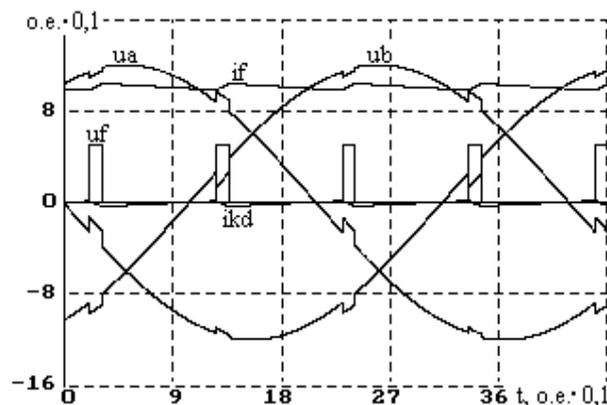


Рис. 4. Холостой ход генератора с импульсным возбуждением

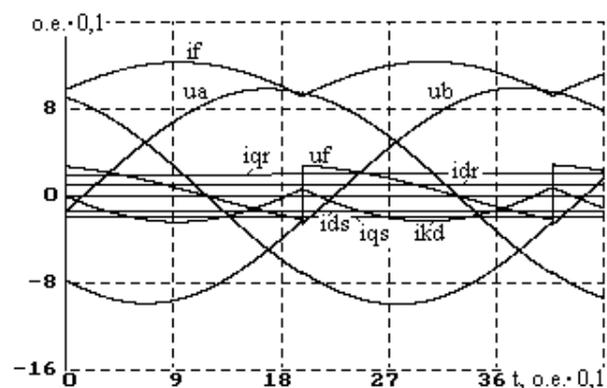


Рис. 5. Стационарный режим генератора с асинхронной нагрузкой при возбуждении от тиристорного выпрямителя

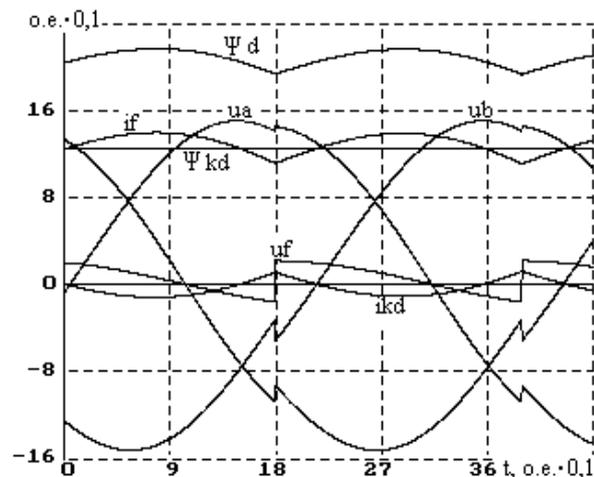


Рис. 6. Холостой ход генератора с возбуждением от тиристорного выпрямителя

В заключение отметим, что точность предлагаемого метода оценки коэффициента несинусоидальности определяется точностью математического описания машин, а также – точностью расчета имитационных моделей. Так как имитационные модели построены непосредственно по уравнениям машин, следует ожидать, что точность моделирования будет не хуже, чем при численном решении этих уравнений посредством процедур, предусмотренных, например, в MathCad, Apple и др. и требующих определенных предварительных преобразований уравнений.

Выводы

1. Существующие методы анализа искажения фазных напряжений синхронных генераторов при импульсном возбуждении отличаются громоздкими аналитическими преобразованиями и дают лишь приближенные значения коэффициента несинусоидальности. Применение имитационного моделирования позволяет преодолеть эти затруднения путем численного анализа искажения напряжения генератора при различных режимах импульсного возбуждения.

2. Достоинством предлагаемой методики является повышенная точность определения коэффициента несинусоидальности, так как определение его производится не через действующие значения гармоник, а непосредственно по мгновенному значению выходного напряжения генератора с различными нагрузками.

3. Проведенные исследования выходного напряжения генератора со статической активно-индуктивной и асинхронной двигательной нагрузками показали, что искажения выходного напряжения генератора в наибольшей степени проявляются в режиме холостого хода, а под нагрузкой – снижается уровень коэффициента несинусоидальности. Повышение частоты импульсного возбуждения также снижает искажения фазного напряжения генератора.

Перечень ссылок

1. Жежеленко И. В., Саенко Ю. Л. Качество электрической энергии на промышленных предприятиях. – М.: Энергоатомиздат. – 2005. – 262 с.
2. Волков А. В., Мирошниченко О. Г. Влияние несинусоидальности формы токов и неравномерности текущей мощности отдельного электропотребителя

на потери в энергосистеме // Электротехника та електроенергетика. – 2007. – № 1 – С. 77–86.

3. Шейникович В. В. Качество электрической энергии на судах. – Л.: Судостроение, 1988. – 160 с.
4. Арриллага Дж. Гармоники в электрических системах / Дж. Арриллага, Д. Бедди, П. Бодшер. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин. – М.: Высш. шк., 2001. – 327 с.
6. Коноплев К. Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронных генераторов в автономных электрических системах // Техн. електродинаміка. – 2006. – № 1. – С. 32–36.
7. Чепендюк Н. Н. Влияние параметров импульсного возбуждения синхронного генератора на процесс регулирования выходного напряжения // Вестник СевГТУ. Вып. 80: Механика, энергетика, экология: Сб. науч. тр. Севастоп. нац. техн. ун-т. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2007. – С. 67–70.
8. Семенов В.В. Модель синхронного генератора с симметричными магнитными параметрами в пакете MatLab // Известия Академии инженерных наук им. А. М. Прохорова. – 2005. – № 15. – С. 61–64.
9. Шакиров М. А. Системные схемы замещения трехфазных машин и их применение для расчета несимметричных режимов электрических систем // Электротехника. – 2003. – № 10. – С. 26–35.
10. Разработка алгоритма и программы расчета переходных процессов в нелинейных электрических цепях / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Ю. И. Паук и др. // Электротехника та електроенергетика. – 2003. – № 1. – С. 75–79.
11. Канов Л. Н. Схемное моделирование электроэнергетических систем переменного тока // Электротехника та електроенергетика. – 2004. – № 1. – С. 5–9.
12. Канов Л. Н. Схемное моделирование параллельной работы синхронных генераторов в автономных электроэнергетических системах // Электротехника та електроенергетика. – 2005. – № 2. – С. 82–86.
13. Яковлев Г. С. Судовые электроэнергетические системы. – Л.: Судостроение, 1987. – 272 с.

Поступила в редакцию 20.12.07. г.

После доработки 20 04.08. г.

Запропоновано заснована на імітаційному моделюванні методика чисельного визначення коефіцієнта несинусоїдальності напруги синхронного генератора при імпульсному збудженні. Побудовано імітаційні моделі генератора з статичним активно-індуктивним і асинхронним двигуном навантаженнями, для яких виконані розрахунки коефіцієнта несинусоїдальності.

Offered based on circuit modeling a strategy numerical determinations non-sine-shaped factor voltages of synchronous generator under pulsed excitement. Built circuit generator models under steady-state inductive and non-synchronous loads. Brought results of calculations of non-sine-shaped factor.