

УДК 621.313.323

К.Г. Коноплев, д-р техн. наук, профессор

Н.Н. Олейниченко, ст. преподаватель

Севастопольский национальный технический университет

ул. Университетская, 33, г. Севастополь, Украина, 99053

E-mail: dlja-chuzhoj-pochty@mail.ru

РАСЧЕТ ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СУДОВЫХ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Предлагается методика расчета фазного напряжения синхронного генератора и коэффициентов несинусоидальности этого напряжения в зависимости от формы импульсов напряжения возбуждения и высших гармоник.

Ключевые слова: синхронный генератор, импульсное регулирование возбуждения, высшие гармоники напряжения.

Актуальность исследования. В настоящее время в автономных электроэнергетических системах и на большей части судов и кораблях иностранной постройки широко применяются синхронные генераторы (СГ) с системами импульсного регулирования, применение которого было обосновано в 1965 году [1]. В частности фирмы STAMFORD-Англия, HYUNDAI-Южная Корея, WARISILA, французские фирмы и многие другие производят СГ с импульсным регулированием. Данный способ регулирования имеет много неоспоримых достоинств: в 100 раз меньше вес и габариты регулятора (1,5–2,0 кг); высокое быстродействие (1–2 периода); высокая точность поддержания напряжения и т.д.

Поэтому необходимо создание математического аппарата для исследования судовых СГ с импульсным регулированием и показателей качества выходного напряжения таких генераторов.

Цель работы – математическое описание кривых фазного напряжения синхронного генератора для оценки влияния импульсного регулирования возбуждения на качественные показатели напряжения, в частности коэффициента несинусоидальности.

В теории импульсного регулирования СГ важное место занимает проблема влияния различных форм импульсов на качество электроэнергии. Формы импульсов возбуждения СГ определяются схемами регуляторов, они могут быть самыми различными: синусоидальными, треугольными, прямоугольными и др. Перечень всех форм импульсов приведен в [2]. Там же приводится разложение форм импульсов в гармонический ряд, которым можно воспользоваться при определении уравнений напряжений возбуждений импульсов с различной частотой. Поэтому целесообразно распространить новый метод определения фазного напряжения СГ на то, как формы импульсов при импульсном регулировании СГ влияют на фазное напряжение и убедиться в универсальности нового метода при появлении высших гармоник. Новый подход основан на классическом методе изображающего вектора [1], в котором мгновенное значение фазного напряжения представляется в виде

$$u_{\phi} = U_d \cos \omega t - U_q \sin \omega t. \quad (1)$$

Таким образом, необходимо определить $U_{dk}(t)$ и $U_{qk}(t)$ для каждой гармоники. При определении фазного напряжения от каждой гармоники необходимо учитывать частоту, напряжение и сопротивление, пропорциональное частоте гармоники. Поэтому величина тока любой гармоники определяется системой уравнений вида:

$$\begin{aligned} U_f(p) &= [p\Psi_f(p) - p\Psi_f(0) + X_f i_f(p)](k\alpha); \\ \Psi_d(p) &= [X_{af} i_f(p) - X_d i_d(p)](k\alpha); \\ \Psi_f(p) &= [X_f i_f(p) - X_{fa} i_d(p)](k\alpha), \end{aligned} \quad (2)$$

где k – порядок гармоники; α – частота импульсов напряжения возбуждения.

Обозначение всех параметров приведено в [4].

Решение системы уравнений (2) в зависимости от начальных условий будет иметь (например, в режиме холостого хода) вид:

$$i_{dok}(p) = \frac{\frac{1}{k} U_{f01}(x_q + x_h)(ka)}{[(r + r_h)^2 + (x'_d + x_h)(x_q + x_h)](ka)^2} \cdot \frac{(p + \frac{1}{T_{d0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}. \quad (3)$$

Тогда составляющие $U_{dok}(p)$ и $U_{qok}(p)$ равны:

$$U_{dok}(p) = \frac{[r_H(x_q + x_H) - x_H(r + r_H)]U_{fok}(ka)^2}{[(r + r_H)^2 + (x'_d + x_H)(x_q + x_H)](ka)^2} \cdot \frac{(p + \frac{1}{T_{d0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}; \quad (4)$$

$$U_{qok}(p) = \frac{[r_H(r + r_H) + x_H(x_q + x_H)]U_{fok}}{[(r + r_H)^2 + (x'_d + x_H)(x_q + x_H)]} \cdot \frac{(p + \frac{1}{T_{d0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}. \quad (5)$$

Следует отметить, что как в первой основной гармонике, так и в любой другой высшей гармонике существуют три составляющие напряжения возбуждения, которые создают соответствующие продольные и поперечные составляющие напряжения генератора, т.е. методика, опубликованная в [3], является общей и для определения фазного напряжения от любой гармоники. Это следующие составляющие: постоянные составляющие напряжения возбуждения от системы холостого хода в каждой гармонике – U_{fok} ; постоянные составляющие напряжения возбуждения от системы регулирования – U_{fk} ; гармонические составляющие напряжения возбуждения от системы регулирования – ΔU_{fk} .

Выше были приведены составляющие $U_{dok}(p)$ и $U_{qok}(p)$ для холостого хода. Аналогичные решения постоянных и гармонических составляющих получаются при решении системы с другими начальными условиями. Каждая гармоника определяется своими системами уравнений. Однако, несмотря на большие различия каждой гармоники, операторные уравнения для продольных и поперечных составляющих напряжений генераторов имеют одинаковую форму записи, потому что условные постоянные и гармонические составляющие напряжений возбуждений имеют постоянные и одинаковые выражения для любой гармоники.

Действительно, при прямоугольных импульсах с $T = 2\tau$ условные постоянные и гармонические составляющие напряжения возбуждения для каждой гармоники соответственно равны

$$\begin{aligned} U''_{f1} &= \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = \text{const}; \\ U''_{f3} &= \frac{U_{f3}}{U_{f03}T_{d0}} = \frac{0,33U_{f1}}{0,33U_{f01}T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}}; \\ U''_{fk} &= \frac{U_{fk}}{U_{fok}T_{d0}} = \frac{\frac{1}{k}U_{f1}}{\frac{1}{k}U_{f01}T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} \end{aligned} \quad (6)$$

или амплитуды условных гармонических составляющих напряжений возбуждений

$$\Delta U'_{f1} = \frac{1,27\Delta U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = \text{const}; \quad \Delta U'_{fk} = \frac{1,27\Delta U_{fk}}{U_{fok}T_{d0}} = \frac{1,27\frac{1}{k}\Delta U_{f1}}{\frac{1}{k}U_{f01}T_{d0}}. \quad (7)$$

При прямоугольных импульсах с $T \gg 2\tau$

$$\begin{aligned} U''_{f1} &= \frac{U_{f1}\rho}{U_{f01}\rho T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = \text{const}; \\ U''_{f3} &= \frac{U_{f3}\rho}{U_{f03}\rho T_{d0}} = \frac{0,33U_{f1}\rho}{0,33U_{f03}\rho T_{d0}} = \frac{U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} \end{aligned} \quad (8)$$

или амплитуды условной гармонической составляющей

$$\begin{aligned} \Delta U'_{f1} &= \frac{1,27\Delta U_{f1}\rho}{\rho U_{f01}T_{d0}} = \frac{1,27\Delta U_{f1}}{U_{f01}T_{d0}} = \text{const}; \quad \rho = \frac{\tau}{T} \\ \Delta U'_{f3} &= \frac{1,27\Delta U_{f3}\rho}{\rho U_{f03}T_{d0}} = \frac{1,27 \cdot 0,33\Delta U_{f1}\rho}{0,33U_{f01}\rho T_{d0}} = \frac{1,27\Delta U_H}{U_{f01}T_{d0}}. \end{aligned} \quad (9)$$

Операторные выражения для любой гармоники имеют одинаковую форму записи и одинаковые оригиналы

$$E(p) = \left[\frac{(p + \alpha)}{p + b} + \frac{U_{f1}}{p + b} \pm \frac{1,27 \Delta U'_{f1} p^2}{(p + b)[p^2 + (k\alpha)^2]} \right], \quad (10)$$

где $\alpha = \frac{1}{T_{d0}}$, $b = \frac{1}{T'_d}$; знак «+» для гармоник 1, 5, 9 и т.д.; знак «-» для гармоник 3, 7, 11 и т.д.

Здесь первое слагаемое учитывает влияние постоянной составляющей напряжения возбуждения от системы холостого хода; второе слагаемое учитывает влияние постоянной составляющей от системы регулирования; третье слагаемое учитывает влияние гармонической составляющей системы регулирования. Оригиналы $E(t)$ приведены в [2].

Продольные и поперечные составляющие напряжения генератора от каждой гармоники равны согласно [2, 3]:

$$U_{dk}(p) = (A_k + C_k p)E(p); \quad U_{qk}(p) = (B_k + D_k p)E(p), \quad (11)$$

где

$$A_k = \frac{[r_H(x_q + x_H) - x_H(r + r_H)]U_{f0k}}{[(r + r_H)^2 + (x'_d + x_H)(x_q + x_H)]}; \quad B_k = \frac{[r_H(r + r_H) + x_H(x_q + x_H)]U_{f0k}}{[(r + r_H)^2 + (x'_d + x_H)(x_q + x_H)]};$$

$$D_k = \frac{[(r + r_H)(x_q + x_H)]U_{f0k}}{[(r + r_H)^2 + (x'_d + x_H)(x_q + x_H)]}; \quad C_k = \frac{[(x_d + x_H)(x_q + x_H)]U_{f0k}}{[(r + r_H)^2 + (x'_d + x_H)(x_q + x_H)]}. \quad (12)$$

Обозначения параметров приведены в [3]. Фазное напряжение каждой гармоники соответственно равно:

$$u_{\phi k} = U_{dk} \cos \omega t - U_{qk} \sin \omega t, \quad (13)$$

где $\omega = 2\pi f_1$; $f_1 = 50$ Гц – частота сети.

Суммарное фазное напряжение генератора равно сумме всех фазных напряжений от каждой гармоники.

$$u_{\phi \Sigma} = u_{\phi 1} + u_{\phi 3} + u_{\phi 5} + u_{\phi 7} + \dots + u_{\phi k} \dots \quad (14)$$

При суммировании фазных напряжений следует учитывать: во-первых, фазные напряжения гармоник и коэффициенты A_k, B_k, C_k, D_k , прямо пропорциональны своим напряжениям, U_{f0k} ; во-вторых, суммарное постоянное напряжение возбуждения от всех гармоник согласно определения не должно превышать средней постоянной величины напряжения возбуждения согласно формул разложения в гармонический ряд.

В результате для каждой формы импульса суммарное фазное напряжение СГ определяется различными выражениями. При синусоидальной форме импульса (подробный вывод приведен в [3])

$$u_{\phi} = \left[\left(\frac{T'_d}{T_{d0}} + U''_f T'_d \right) A - W_i C \Delta U'_f \sin(\alpha t) \right] \cos \omega t - \left[\left(\frac{T'_d}{T_{d0}} + U''_f T'_d \right) B - W_i D \Delta U'_f \sin(\alpha t) \right] \sin \omega t,$$

при прямоугольных импульсах и $T = 2\tau$:

$$u_{\phi \Sigma} = \left[\left(\frac{T'_d}{T_{d0}} + U''_{f1} T'_d \right) A_1 - 0,927 \cdot W_i C_1 \Delta U'_{f1} \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\alpha)t \right] \cos \omega t -$$

$$- \left[\left(\frac{T'_d}{T_{d0}} + U''_{f1} T'_d \right) B_1 - 0,927 \cdot W_i D_1 \Delta U'_{f1} \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\alpha)t \right] \sin \omega t.$$

$$U'_{f1} = \frac{1,41 - \frac{T'_d}{T_{d0}} B}{T'_d B},$$

при прямоугольных импульсах и $T \gg 2\tau$:

$$u_{\phi\Sigma} = \left[\left(\frac{T'd}{T_{d0}} + U''_{f1} T'd \right) \rho A_1 - 0,927 \cdot W_i C_1 \Delta U'_{f1} \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\rho\pi) \sin(k\alpha)t \right] \cos \omega t -$$

$$- \left[\left(\frac{T'd}{T_{d0}} + U''_{f1} T'd \right) \rho B_1 - 0,927 \cdot W_i D_1 \Delta U'_{f1} \sum_{k=1,3,5,7} \sin(k\rho\pi) \sin(k\alpha)t \right] \sin \omega t ;$$

$$U''_{f1} = \Delta U'_{f1}; \quad U''_{f1} = \frac{1,41 - \frac{T'_d}{T_{d0}} B_1 \rho}{T'_d B \rho}.$$

При регулировании напряжения СГ по способу параметрической стабилизации (ПСН) [5] ширина импульсов является переменной величиной, зависящей от режима работы генератора. Поэтому определение коэффициентов несинусоидальности возможно только путем решения системы уравнений, описывающих форму фазного напряжения СГ с ПСН:

$$u_{\phi}(t) = \left\{ \left(\frac{D_5}{T_f} \cdot U_f - D_8 \cdot \psi_f + D_9 \cdot \psi_{\Delta d} \right) \frac{1}{\omega} + \psi_{\Delta q} + k_9 \cdot i_q - \left(R + \frac{D_{10}}{\omega} \right) \times \right.$$

$$\times i_d + \left(i_{qcn} - \frac{R_H}{x_H} \cdot i_{dcn} \right) \cdot D_6 \left. \right\} \cdot \frac{1}{k_{10}} \cos \omega t -$$

$$- \left\{ D_5 \cdot \psi_f + D_6 \cdot i_d - D_7 \cdot \psi_{\Delta d} + \frac{1}{\omega \cdot T_{\Delta q}} \cdot \psi_{\Delta q} - \left(R + \frac{\mu_q \cdot x_q}{\omega \cdot T_{\Delta q}} \right) \cdot i_q + \left(\frac{R_H}{x_H} \cdot i_{qcn} + i_{dcn} \right) \cdot k_9 \right\} \cdot \frac{1}{k_{11}} \sin \omega t; \quad (15)$$

$$U_n(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} S(\omega) K(j\omega) e^{j\omega t} d\omega;$$

$$\left. \begin{aligned} U_f &= 0, \text{ if } U_n > U_{on} \\ U_f &= k_{\phi} U_{fn}, \text{ if } U_n \leq U_{on} \end{aligned} \right\}$$

Графическое решение системы (1), выполненное численными методами пакета MathCad, приведено на рисунке 1. Разложение полученной расчетным путем кривой напряжения генератора производится специальными функциями с помощью программных средств, например, пакета MathCad.

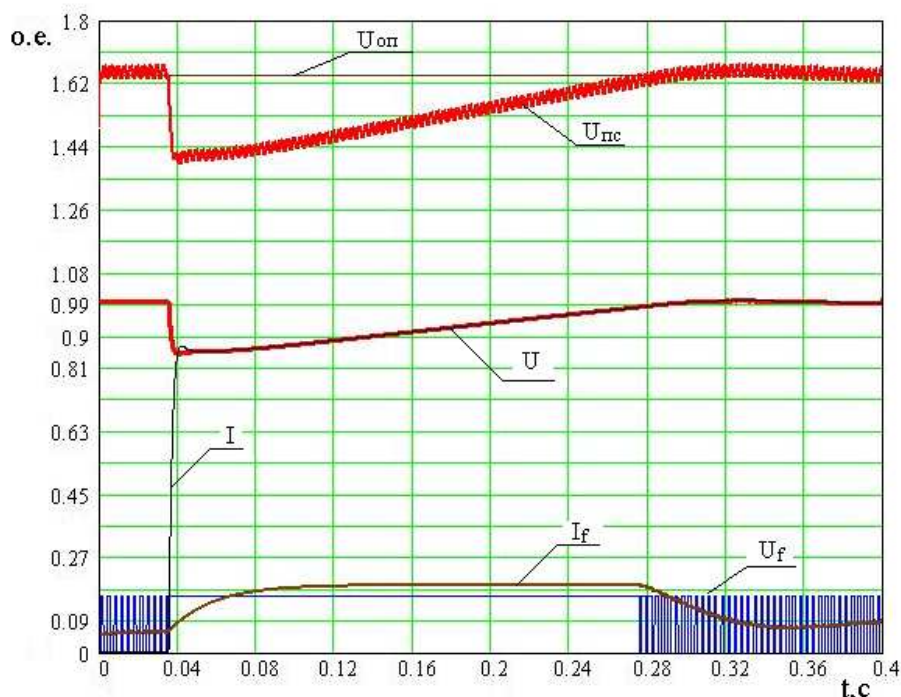


Рисунок 1 – Моделирование переходного процесса СГ ПНТ-45 при подключении статического потребителя

Выводы. Предложенная методика определения фазного напряжения позволяет получить аналитические выражения для определения формы фазного напряжения СГ при импульсах возбуждения разных форм, выявить возникновение высших гармоник и их влияние на форму фазного напряжения, определить коэффициенты несинусоидальности, и таким образом определить качество электроэнергии при импульсном регулировании СГ.

Перспективы дальнейших исследований. Полученные результаты положены в основу разработки систем импульсного регулирования судовых синхронных генераторов малой и средней мощности.

Библиографический список использованной литературы

1. Петров Ю.П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин / Ю.П. Петров // Электричество. — 1964. — № 10. — С. 45–48.
2. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке [и др.]. — М.: Энергия, 1975. — 436 с.
3. Коноплев К.Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронного генератора в автономных электрических системах / К.Г. Коноплев // Техническая электродинамика. — 2006. — № 1. — С. 68–71.
4. Коноплев К.Г. Повышение качества электроэнергии в автономных электрических системах при импульсном регулировании / К.Г. Коноплев. — Севастополь: Изд-во СВМИ им. П.С. Нахимова, 2006. — 208 с.
5. Чепендюк Н.Н. Математическая модель бесщеточного синхронного генератора с параметрической стабилизацией напряжения / Н.Н. Чепендюк // Оптимизация производственных процессов: сб. науч. тр. — Севастополь, 2006. — Вып. 9. — С. 65–71.

Поступила в редакцию 02.03.2012 г.

Конопльов К.Г., Олейніченко Н.М. Методика розрахунку вищих гармонік під час імпульсного регулювання судових синхронних генераторів

Запропоновано методику розрахунку фазних напруг генераторів і коефіцієнтів несінусоїдальності цієї напруги в залежності від форми імпульсів напруги збудження і вищих гармонік.

Ключові слова: синхронний генератор, імпульсне регулювання збудження, вищі гармоніки напруги.

Konopljov K.G., Oleynichenko N.N. A method of calculating the higher harmonics at pulse regulation of synchronous generators

A method of calculating the phase voltage generator in non-sinusoidality this voltage depends on the shape of the pulse voltage excitation is proposed.

Keywords: synchronous generator, pulse regulation of excitation, higher harmonics of voltage.