І. ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.322

К. Г. Коноплев д-р техн. наук, Н. Н. Олейниченко

Севастопольский национальный технический университет

НОВЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА ВЫСШИХ ГАРМОНИК ПРИ ИМПУЛЬСНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Получены аналитические выражения фазного напряжения генераторов и коэффициентов несинусоидальности в зависимости от формы импульсов напряжения возбуждения и высших гармоник.

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

В настоящее время в автономных электроэнергетических системах и на большей части судов и кораблях применяются синхронные генераторы (СГ) с системами импульсного регулирования [1]. Данный способ регулирования имеет много достоинств:

1) в 100 раз меньше вес и габариты регулятора (1,5–2,0 кг);

2) высокое быстродействие (1,2 периода);

3) высокая точность поддержания напряжения и т. д.

Однако в теории импульсного регулирования СГ важное место занимает проблема влияния различных форм импульсов на качество электроэнергии, которая до настоящего времени недостаточно изучена. Формы импульсов напряжения возбуждения СГ определяются схемами регуляторов, и они могут иметь самые различные формы: синусоидальную, треугольную, прямоугольную и др. Перечень всех форм импульсов приведен в [2]. В [2] приведено разложение всех форм импульсов в гармонический ряд, которым можно воспользоваться при определении уравнений напряжения возбуждения импульсов с различной частотой импульсов. 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 многих особенностей высших гармоник. Новый метод основан на классическом методе изображающего вектора [3], в котором мгновенное значение фазного напряжения равно

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

Таким образом, необходимо определить $U_{dk}(t)$ и $U_{qk}(t)$ от каждой гармоники. При определении фазного напряжения от каждой гармоники необходимо учитывать, что каждая гармоника имеет свои параметры: частоту, напряжение и сопротивление, пропорциональное частоте гармоники. Поэтому величина тока любой гармоники определяется системой уравнений, которая имеет следующий вид:

$$U_f(p) = \left[p\Psi_f(p) - p\Psi_f(0) + X_f i_f(p)\right](k\alpha);$$

$$\Psi_d(p) = \left[X_{af} i_f(p) - X_d i_d(p)\right]\ (k\alpha);$$

$$\Psi_f(p) = \left[X_f i_f(p) - X_{fa} i_d(p)\right]\ (k\alpha), \qquad (2)$$

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

Обозначение всех параметров приведено в [3, 5, 6].

Решение этой системы уравнений приведено в [4, 5] и в зависимости от начальных условий может иметь, например, в режиме холостого хода, следующий вид:

$$i_{dok}(p) = \frac{\frac{1}{k} U_{f_{01}} (x_q + x_н)(ka)}{[(r + r_н)^2 + (x'_d + x_н)(x_q + x_н)](ka)^2} \times$$

$$\times \frac{(p + \frac{1}{T_{d_0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}. \qquad (3)$$

Тогда составляющие $U_{dok}(p)$ и $U_{qok}(p)$ определяются выражениями [5]

$$U_{dok}(p) = \frac{[r_н(x_q + x_н) - x_н(r + r_н)]U_{fok}\ (ka)^2}{[(r + r_н)^2 + (x'_d + x_н)(x_q + x_н)](ka)^2} \times$$

$$\times \frac{(p + \frac{1}{T_{d_0}})}{(p + \frac{1}{T'_d})}; \qquad (4)$$

$$U_{qok}(p)=\frac{[r_н(r+r_н)+x_н(x_q+x_н)]U_{fok}}{[(r+r_н)^2+(x'_d+x_н)(x_q+x_н)]}\times$$

$$\times\frac{(p+\frac{1}{T_{d_0}})}{(p+\frac{1}{T'_d})}. \quad (5)$$

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, 5, 6], является общей и для определения фазного напряжения от любой гармоники. Это следующие три 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 $U_{qok}(p)$ от системы холостого хода. Аналогичные решения получаются от постоянных и гармонических составляющих от системы регулирования, но с другими начальными условиями. Таким образом, каждая гармоника определяется своими системами уравнений. Однако, несмотря на большие различия каждой гармоники, операторные уравнения для продольных и поперечных составляющих напряжения генераторов имеют одинаковую форму записи. Это объясняется тем, что условные постоянные и гармонические составляющие напряжений возбуждения имеют постоянные и одинаковые выражения для любой гармоники.

Действительно, при прямоугольных импульсах с $T=2\tau$ условные постоянные и гармонические напряжения возбуждения для каждой гармоники соответственно равны, в зависимости от системы регулирования,

$$U''_{f_1}=\frac{U_{f_1}}{U_{fo1}T_{d_0}}=\text{const}; \quad (6)$$

$$U''_{f_3}=\frac{U_{f_3}}{U_{fo3}T_{d_0}}=\frac{0{,}33U_{f_1}}{0{,}33U_{fo1}T_{d_0}}=\frac{U_{f_1}}{U_{fo1}T_{d_0}};$$

$$U''_{fk}=\frac{U_{fk}}{U_{fok}T_{d0}}=\frac{\frac{1}{k}U_{f1}}{\frac{1}{k}U_{fo1}T_{d0}}=\frac{U_{f1}}{U_{fo1}T_{d0}}$$

или амплитуды условных гармонических составляющих напряжений возбуждения

$$\Delta U'_{f_1}=\frac{1{,}27\Delta U_{f_1}}{U_{fo1}T_{d_0}}=\text{const}; \quad (7)$$

$$\Delta U'_{f_k}=\frac{1{,}27\Delta U_{f_k}}{U_{fok}T_{d_0}}=\frac{1{,}27\frac{1}{k}\Delta U_{f_1}}{\frac{1}{k}U_{fo1}T_{d_0}}.$$

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

$$U''_{f_1}=\frac{U_{f_1}\rho}{U_{fo1}\rho T_{d_0}}=\frac{U_{f_1}}{U_{fo1}T_{d_0}}=\text{const}; \quad (8)$$

$$U''_{f_3}=\frac{U_{f_3}\rho}{U_{fo3}\rho T_{d_0}}=\frac{0{,}33U_{f_1}\rho}{0{,}33U_{fo3}\rho T_{d_0}}=\frac{U_{f_1}}{U_{fo1}T_{d_0}};$$

или амплитуда условной гармонической составляющей

$$\Delta U'_{f_1}=\frac{1{,}27\Delta U_{f_1}\rho}{\rho U_{fo1}T_{d_0}}=\frac{1{,}27\Delta U_{f_1}}{U_{fo1}T_{d_0}}=const,\ \rho=\frac{\tau}{T}; \quad (9)$$

$$\Delta U'_{f_3}=\frac{1{,}27\Delta U_{f_3}\rho}{\rho U_{fo3}T_{d_0}}=\frac{1{,}27\cdot 0{,}33\Delta U_{f_1}\rho}{0{,}33U_{fo1}\rho T_{d_0}}=\frac{1{,}27\Delta U_н}{U_{fo1}T_{d_0}}.$$

В результате 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 $\alpha=\frac{1}{T_{d_0}}$; $b=\frac{1}{T'_d}$; 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 [3, 5].

Тогда продольные и поперечные составляющие напряжения генератора от каждой гармоники определяются выражениями [3, 5]

$$U_{dk}(p)=(A_k+C_kp)E(p); \quad (11)$$

$$U_{qk}(p)=(B_k+D_kp)E(p), \quad (12)$$

где

$$A_k=\frac{[r_н(x_q+x_н)-x_н(r+r_н)]U_{fok}}{[(r+r_н)^2+(x'_d+x_н)(x_q+x_н)]};$$

$$B_k = \frac{[r_н(r+r_н)+x_н(x_q+x_н)]U_{fok}}{[(r+r_н)^2+(x'_d+x_н)(x_q+x_н)]};$$

$$D_k = \frac{[(r+r_н)(x_q+x_н)]U_{fok}}{[(r+r_н)^2+(x'_d+x_н)(x_q+x_н)]};$$

$$C_k = \frac{[(x_d+x_н)(x_q+x_н)]U_{fok}}{[(r+r_н)^2+(x'_d+x_н)(x_q+x_н)]}.$$

Обозначения параметров приведены в [3, 5, 6] и в приложении.

Фазное напряжение каждой гармоники

$$u_{фk} = U_{dk}\cos\omega t - U_{qk}\sin\omega t, \tag{13}$$

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

Суммарное фазное напряжение генератора равно сумме всех фазных напряжений от каждой гармоники, а именно,

$$u_{ф\Sigma} = u_{ф_1} + u_{ф_3} + u_{ф_5} + u_{ф_7} + ... + u_{ф_k}.... \tag{14}$$

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

В результате для каждой формы импульса суммарное фазное напряжение СГ определяется следующими выражениями. При синусоидальной форме импульса подробный вывод приведен в [3, 5].

$$u_ф = \left[(\frac{T'_d}{T_{d_0}} + U''_f T'_d)A - W_i C \Delta U'_f \sin(\alpha t)\right]\cos\omega t -$$
$$-\left[(\frac{T'_d}{T_{d_0}} + U''_f T'_d)B - W_i D \Delta U'_f \sin(\alpha t)\right]\sin\omega t. \tag{15}$$

При прямоугольных импульсах и $T = 2\tau$

$$u_{ф\Sigma} = \left[(\frac{T'_d}{T_{d_0}} + U''_{f_1}T'_d)A_1 - 0{,}927 W_i C_1 \Delta U'_{f_1} \times\right.$$
$$\left.\times \sum_{k=1,3,5,7}\sin(k\alpha)t\right]\cos\omega t - \left[(\frac{T'd}{T_{d_0}} + U''_{f_1}T'd)B_1 -\right.$$
$$\left.- 0{,}927\cdot W_i D_1 \Delta U'_{f_1}\sum_{k=1,3,5,7}\sin(k\alpha)t\right]\sin\omega t. \tag{16}$$

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

При прямоугольных импульсах и $T >> 2\tau$

$$u_{ф\Sigma} = \left[(\frac{T'd}{T_{d_0}} + U''_{f_1}T'd)\rho A_1 - 0{,}927 W_i C_1 \Delta U'_{f_1} \times\right.$$
$$\left.\times \sum_{k=1,3,5,7}\sin(k\rho\pi)\sin(k\alpha)t\right]\cos\omega t - \left[(\frac{T'd}{T_{d_0}} + U''_{f_1}T'd)\rho B_1 -\right.$$
$$\left.- 0{,}927\cdot W_i D_1 \Delta U'_{f_1}\sum_{k=1,3,5,7}\sin(k\rho\pi)\sin(k\alpha)t\right]\sin\omega t; \tag{17}$$

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

Таким образом, предложенный новый метод определения фазного напряжения позволил для каждой формы импульсов получить аналитические выражения для определения формы фазного напряжения СГ, выявить возникновение высших гармоник и их влияние на форму фазного напряжения и определить коэффициенты несинусоидальности при любой форме импульса, т. е. определить качество электроэнергии при импульсном регулировании СГ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Петров Ю. П. Использование «принципа максимума» для нахождения оптимального закона регулирования синхронных машин / Ю. П. Петров. – М. : Электричество, 1964. – № 10. – С. 45–48.
2. Основы теории цепей / [Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Стахов]. – 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. Определение синхронного генератора с различными системами регулирования при включении нагрузки / К. Г. Коноплев // Техническая электродинамика. – 1998. – № 5. – С. 78–85.
5. Коноплев К. Г. Повышение качества электроэнергии в автономных электрических системах при импульсном регулировании / К. Г. Коноплев. – Севастополь : СВМИ им. П. С. Нахимова, 2006. – 200 с.
6. Коноплев К. Г. Определение коэффициента несинусоидальности при импульсном регулировании синхронных генераторов / К. Г. Коноплев // Техническая электродинамика. – 2007. – № 6. – С. 46–51.

Стаття надійшла до редакції 23.10.2010 р.

Коноплььов К. Г., Олейніченко Н.Н. Новий метод розрахунку вищих гармонік при імпульсному регулюванні синхронних генераторів.
Отримано аналітичні вирази фазної напруги генераторів і коефіцієнтів несинусоїдальності залежно від форми імпульсів напруги збуджень і вищих гармонік.
Ключові слова: *синхронний генератор, імпульсне регулювання збудження, вищі гармоніки напруги.*

Konoplyov K., Oleynichenko N. New method of higher harmonics calculation at pulse control of synchronous generators.
Analytical expressions are derived for generators phase voltage and unsinusoidality coefficients depending on the form of excitation voltage pulses and higher harmonics.
Key words: *synchronous generator, excitation pulse control, voltage higher harmonics.*

УДК 621.3

Л. Н. Канов канд. техн. наук

Севастопольский национальный технический университет

БЕЗЫТЕРАЦИОННЫЙ РАСЧЕТ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ С НЕЛИНЕЙНЫМИ РЕАКТИВНОСТЯМИ

Предлагается методика расчета динамических режимов электрических цепей, содержащих нелинейные индуктивности и емкости. Методика основана на явных методах интегрирования дифференциальных уравнений и требует на каждом шаге решения просчета линейной цепи, что сокращает время расчета по сравнению с обычно применяемыми итерационными методами. Методика иллюстрирована расчетом процесса включения трансформатора.

Ключевые слова: *безитерационный расчет, электрические цепи, динамический режим, нелинейная реактивность, явные методы интегрирования, включение трансформатора.*

Введение

Расчеты динамических режимов в нелинейных электромагнитных цепях применяются при проектировании и моделировании электротехнических систем. Для таких расчетов в сложных цепях с крутыми характеристиками нелинейных элементов используются зарубежные и отечественные программные продукты, такие как NAP, PSpise, MatLab Simulink, COLO [1] и др., решение в которых производится на основании неявных методов интегрирования дифференциальных уравнений. В этих методах вычисления на каждом шаге расчета сопровождаются итерационным процессом определения переменных, скорость сходимости которого зависит от начальных приближений и свойств цепи. Время расчета, поэтому может быть большим. Неудачный выбор начальных приближений приводит к отказу решения. Явные методы в таких расчетах имеют меньшую точность. В обычной ситуации отсутствия или невозможности получения нормальной формы дифференциальных уравнений на каждом шаге здесь также возникает необходимость итерационного расчета нелинейной цепи постоянного тока, как и при применении неявных методов.

Вместе с тем, существует круг задач, для решения которых применение явных методов оправдано. Эти задачи связаны с расчетом режимов в цепях, содержащих только реактивные из нелинейных элементов. К таким задачам относятся, например, расчеты переходных процессов в трансформаторах, реакторах [1, 2]. В этих условиях для нежестких задач явные методы мало уступают неявным, и в них отсутствуют отмеченные затруднения, характерные для неявных методов.

В жестких задачах подобного типа явные методы применяются совместно с неявными для получения начальных приближений итерационного процесса на каждом шаге. Кроме того, явные методы позволяют получать значения переменных на нескольких первых шагах расчета, без которых неявный многошаговый метод не может стартовать.

Отличительными особенностями применения явных методов к рассматриваемым задачам является возможность безытерационного расчета процесса на шаге, что сокращает время расчета, и отсутствие необходимости составления дифференциальных уравнений цепи. Эти особенности связаны с построением и последующим расчетом линейных схем постоянного тока, число