

Определение коэффициента несинусоидальности при импульсном регулировании синхронных генераторов

Получены аналитические выражения для определения высших гармоник и коэффициентов несинусоидальности при импульсном регулировании синхронных генераторов.

Одержано аналітичні вирази для визначення вищих гармонік та коефіцієнтів несинусоїдальності при імпульсному регулюванні синхронних генераторів.

В [2] с помощью нового метода получена расчетная формула для определения фазного напряжения синхронного генератора (СГ) при импульсном регулировании

$$u_{\phi} = \left[\left(T'_d / T_{d0} + U''_f T'_d \right) A - w_i C U''_f \sin \alpha t \right] \cos \omega t - \left[\left(T'_d / T_{d0} + U''_f T'_d \right) B - w_i D U''_f \sin \alpha t \right] \sin \omega t, \quad (1)$$

где $A = \frac{[r_n(x_q + x_n) - x_n(r + r_n)] U_{f0}}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)]}$;

$$B = \frac{[r_n(r + r_n) + x_n(x_q + x_n)] U_{f0}}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)]}$$

$$C = \frac{(x'_d + x_n)(x_q + x_n) U_{f0}}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)]}$$

$$D = \frac{(x_q + x_n)(r + r_n) U_{f0}}{[(r + r_n)^2 + (x'_d + x_n)(x_q + x_n)]}$$

r — активное сопротивление цепи статора; r_n, x_n — активное и реактивное сопротивления нагрузки; x'_d, x'_q — индуктивное сопротивление обмоток статора по осям d и q ; x'_d — переходное индуктивное сопротивление обмотки статора по продольной оси d ; T_{d0} — постоянная времени цепи возбуждения при разомкнутой обмотке статора; T'_d — постоянная времени цепи возбуждения при замкнутой обмотке статора; w_i — коэффициент Пенселе (при независимом возбуждении СГ $w_i = 0,012$, при самовозбуждении СГ $w_i = 0,05$); α — круговая частота импульсов напряжения возбуждения ($\alpha = 2\pi f_2$); U_{f0} — напряжение возбуждения СГ холостого хода; U''_f — условная постоянная составляющая напряжения возбуждения в относительных единицах ($U''_f = U_f / U_{f0} T_{d0}$); ω — круговая частота напряже-

ния сети ($\omega = 2\pi f_1$, $f_1 = 50$ Гц); U_f — напряжение возбуждения СГ при нагрузке; t — время.

Следует отметить, что новый метод [1, 2] основан на методе изображающего вектора и уравнениях Горева-Парка. Полученная расчетная формула (1) является универсальной, она позволяет учитывать всю сложность переходных процессов СГ и системы регулирования.

Уравнение (1), введя $n = f_2 / f_1$, можно привести к виду

$$u_{\phi} = A' \cos \omega t - B' \sin \omega t - C' \sin [\omega t (n-1)] + D' \cos [\omega t (n-1)] - C' \sin [\omega t (n+1)] - D' \cos [\omega t (n+1)], \quad (2)$$

где A', B' — продольная и поперечная составляющие амплитуды первой гармоники; C', D' — поперечная и продольная составляющие амплитуд высших гармоник, $A' = (T'_d / T_{d0} + U''_f T'_d) A$; $B' = (T'_d / T_{d0} + U''_f T'_d) B$; $C' = 0,5 w_i C U''_f$; $D' = 0,5 w_i D U''_f$. Например, при $f_2 = 300$ Гц

$$u_{\phi} = A' \cos \omega t - B' \sin \omega t + D' \cos 5 \omega t - C' \sin 5 \omega t - D' \cos 7 \omega t - C' \sin 7 \omega t. \quad (3)$$

Выражение (3) показывает, при какой частоте импульсного напряжения возбуждения какие гармоники появляются в фазном напряжении и какое оказывают влияние. При этом коэффициенты при соответствующих гармониках A', B', C', D' одновременно являются коэффициентами гармоник, которые определяют коэффициент несинусоидальности. В зависимости от соотношения частот f_2 и f_1 могут появляться как четные, так и нечетные гармоники: при $n=4$ — 3 и 5 гармоники; при $n=5$ — 4 и 6 гармоники; при $n=6$ — 5 и 7 гармоники.

Важным параметром качества электроэнергии является коэффициент несинусоидальности, значение которого определяется ГОСТом. Общее вы-

ражение для коэффициента несинусоидальности имеет вид

$$K_{nc} = \left[\left(\sum U_v^2 \right)^{0.5} / U_1 \right] \cdot 100\%,$$

де U_1 — действующее значение напряжения первой гармоники; U_v — действующее значение v -ой гармонической составляющей напряжения; v — порядок гармонической составляющей.

После соответствующих подстановок, получим

$$K_{nc} = \left[\frac{A^2(n-1)m/2 + A^2(n+1)m/2}{A_{1m}/\sqrt{2}} \right]^{0.5} \cdot 100\% = \\ = [(C'^2 + D'^2)^{0.5} / A_1] \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $A_{1m}/\sqrt{2}$, $A_{(n-1)m}/\sqrt{2}$, $A_{(n+1)m}/\sqrt{2}$ — действующие значения первой, $(n-1)$ и $(n+1)$ гармонических составляющих напряжения.

Таким образом, полученное уравнение (1) позволяет по коэффициентам этого уравнения определить значение коэффициента несинусоидальности (4), выявить, какие появляются гармоники по уравнению (2) и определить форму кривой фазного напряжения.

Например, для генератора МСК-500 с параметрами $x_d = 2,03$; $x_q = 0,95$; $r = 0,8$; $x_H = 0,6$; $x'_d = 0,178$; $r = 0,03$; $T_{d0} = 2,6$ с при независимом возбуждении $w_i = 0,012$ и $f_2 = 300$ Гц уравнение (1) превращается в следующее:

$$u_\phi = [0,68 - 0,03 \sin(1884t)] \cos(314t) - \\ - [1,41 - 0,0092 \sin(1884t)] \sin(314t), \quad (5)$$

где $A = 0,41$; $B = 0,85$; $C = 2,35$; $D = 0,719$; $C' = 0,03$; $D' = 0,0092$; $A_1 = 1,1$; $a = 2\pi f_2 = 1884$; $\omega = 2\pi f_1 = 314$; $T'_d = 1,1$ с.

Кривая изменения фазного напряжения в относительных единицах показана на рис. 1.

При самовозбуждении СГ уравнение (5) видоизменяется, так как $w_i = 0,05$

$$u_\phi = [0,68 - 0,15 \sin(1884t)] \cos(314t) - \\ - [1,41 - 0,046 \sin(1884t)] \sin(314t). \quad (6)$$

Кривая изменения фазного напряжения, полученная по уравнению (6), показана на рис. 2.

Если определить коэффициент несинусоидальности с помощью компьютерных программ [3] и использованием уравнений (5) и (6), то получим, что коэффициент несинусоидальности для уравнения (5) и рис. 1 равен $K_{nc1} = 2,5$, а для уравнения (6) и рис. 2 — $K_{nc2} = 10,0$. Коэффициенты несинусоидальности, определенные по полученной аналитической формуле (4), соответственно равны

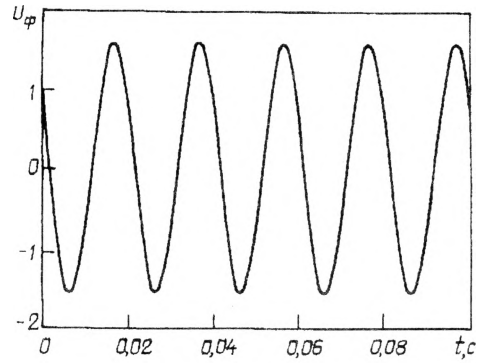


Рис. 1

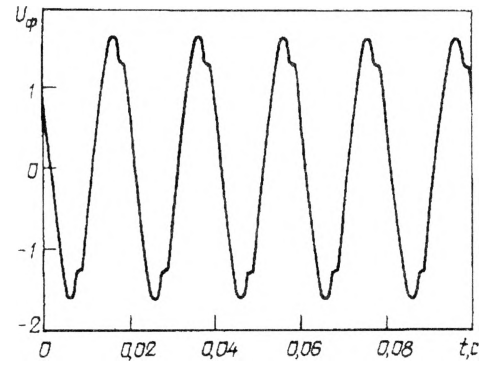


Рис. 2

$$K'_{nc1} = 1,41, \quad K'_{nc2} = 7,05.$$

Для уравнения (5) $C' = 0,03$; $D' = 0,0092$ и $A_1 = 1,1$

$$K_{nc1} = \left[(0,015^2 + 0,0046^2)^{0.5} / 1,1 \right] \cdot 100\% = 1,41\%.$$

Для уравнения (6) —

$$K_{nc2} = \left[(0,075^2 + 0,023^2)^{0.5} / 1,1 \right] \cdot 100\% = 7,05\%.$$

Приведенные ниже результаты показывают, что существующие компьютерные программы для определения коэффициента несинусоидальности дают завышенные значения.

Выводы. Предложенная формула (1) является многофункциональной и позволяет определить форму фазного напряжения СГ, выявить какие возникают высшие гармоники в зависимости от соотношения частот импульсов и частоты сети и аналитическое выражение для коэффициента несинусоидальности.

Существующие компьютерные программы [3] для определения коэффициента несинусоидальности дают завышенное значение по сравнению со значением коэффициента несинусоидальности, которое определяется полученной формулой (6).

1. Коноплев К.Г. Изменение фазного напряжения при импульсном регулировании синхронного генератора в автономных электрических системах. — Техн. электродинамика. — 2006. — № 1. — С. 68—71.

2. Коноплев К.Г. Повышение качества электрической энергии в автономных электрических системах при импульсном регулировании. — Монография. — 2006. — 200 с.

3. Дьяконов В.П. MathCAD 7. Москва, 1999. — 352 с.

Надійшла 13.03.2007