

УДК 621.313.322.01

Академик НАН Армении Г. Л. Арешян

Формулы подскоков и провалов напряжений синхронного генератора

(Представлено 11/V 1998)

При отключении нагрузки автономно работающего синхронного генератора (СГ) происходят подскоки напряжений $\Delta u_d(t)$ и $\Delta u_q(t)$. Теоретическое исследование этого переходного процесса до сих пор никем не было произведено, так как такое исследование затруднено необходимостью решения нелинейных дифференциальных уравнений высокого порядка (до седьмой степени) с учетом переменных параметров электрической дуги, которая возникает между расходящимися при размыкании контактами выключателя. Электрические дуги во всех трех фазах обязательно имеют место, ввиду наличия индуктивностей в размыкающихся электрических контурах. В данной работе представлены окончательные результаты проведенных автором теоретических исследований и даются аналитические формулы подскоков напряжений СГ при частично или полностью отключаемой нагрузке с учетом форсировки возбуждения.

Переменные параметры электрической дуги – активное сопротивление и ее индуктивность аппроксимировались степенными рядами от времени t

$$R_g(t) = r_g + r_o \sum_{k=1}^k v_k \frac{t^k}{k!}; \quad L_g(t) = L_o \sum_{k=1}^k \mu_k \frac{t^k}{k!}, \quad (1)$$

где r_g – сопротивление дуги в момент $t = 0^+$.

Такая аппроксимация наиболее полно и просто может учитывать различные факторы, определяющие характеристики и поведение электрической дуги (1), с помощью соответствующего подбора r_g и коэффициентов v_k и μ_k .

Для получения аналитических формул подскоков напряжений в окрестности $t = 0$ был использован предложенный автором метод построения асимптотических решений переходных процессов в электрических цепях (2) в виде степенных рядов от времени t . Рассматривался случай СГ, имеющего демп-

ферные клетки по обеим осям и подключенного к двум нагрузкам $Z_1(p) = pL_1 + r_1$ и $Z_2(p) = pL_2 + r_2$, включенным параллельно.

Считалось, что в момент $t = 0$ происходит отключение нагрузки $Z_1(p)$ и одновременно происходит форсировка возбуждения, т.е. в цепи обмотки возбуждения СГ скачком изменяется напряжение на величину Δu_ψ . Наличие возникающей дуги учитывалось включением между зажимами СГ и нагрузки $Z_2(p)$ дополнительного операторного сопротивления (во всех трех фазах) $Z_g(p) = pL_g + R_g(p)$, активное сопротивление и индуктивность которого задавались уравнением (1). В результате решений получены следующие аналитические выражения СГ при отключении нагрузки Z_2 без форсировки в окрестности $t = 0$:

$$\begin{aligned}\Delta u_d(t) &= S_{d0} + S_{d1} \cdot t + S_{d2} \cdot \frac{t^2}{2!} + \dots; \\ \Delta u_q(t) &= S_{q0} + S_{q1} \cdot t + S_{q2} \cdot \frac{t^2}{2!} + \dots,\end{aligned}\quad (2)$$

где первые коэффициенты равны

$$S_{d0} = \frac{L_1 L''_{d0} (r_g + \mu_1 L_0) i_{d2}^o}{L_1 L''_{d0} + L_2 L''_{d0} + L_1 L_2}; \quad S_{q0} = \frac{L_1 L'_{q0} (r_g + \mu_1 L_0) i_{q2}^o}{L_1 L'_{q0} + L_2 L'_{q0} + L_1 L_2}.\quad (3)$$

Следующие два коэффициента равны

$$\begin{aligned}S_{d1} &= L_2 \Phi_{d2} a_{q1} - (r_2 + r_g) F_{d2} a_{d1} - x_2 F_{q2} a_{q1} + a_{d2}; \\ S_{q1} &= -L_2 \Phi_{q2} a_{d1} - (r_2 + r_g) F_{q2} a_{q1} + x_2 F_{d2} a_{d1} + a_{q2},\end{aligned}\quad (4)$$

где

$$\left. \begin{aligned}F_{d2} &= \frac{L''_{d0} + L_1}{D''_d}; \quad \Phi_{d2} = \frac{\omega_0 (L'_{q0} + L_1)}{D''_d}; \\ F_{q2} &= \frac{L'_{q0} + L_1}{D'_q}; \quad \Phi_{q2} = \frac{\omega_0 (L''_{d0} + L_1)}{D'_q}; \\ D''_d &= L_1 L''_{d0} + L_2 L''_{d0} + L_1 L_2; \quad D'_q = L_1 L'_{q0} + L_2 L'_{q0} + L_1 L_2\end{aligned}\right\} \quad (5)$$

$$\left. \begin{aligned}a_{d1} &= (r_g + \mu_1 L_0) i_{d2}^o; \quad a_{q1} = (r_g + \mu_1 L_0) i_{q2}^o; \\ a_{d2} &= (v_1 r_o + \mu_2 L_0) i_{d2}^o + \mu_1 x_0 i_{q2}^o; \\ a_{q2} &= (v_1 r_o + \mu_2 L_0) i_{q2}^o - \mu_1 x_0 i_{d2}^o.\end{aligned}\right\} \quad (6)$$

Токи i_{d2}^o и i_{q2}^o являются токами в цепи Z_2 при стационарном режиме СГ до отключения Z_2 . L''_{d0} и L'_{q0} — сверхпереходной по продольной оси и переходной по поперечной оси индуктивностями СГ. В случае отсутствия демпферных клеток имеем вместо L''_{d0} переходную индуктивность L'_{d0} , а вместо L'_{q0} просто индуктивность L_q .

Выражения остальных коэффициентов S_{dk} и S_{qk} ($k=2,3,\dots$) в (2) не приводятся ввиду их громоздкости.

Если в момент отключения нагрузки Z_2 имеет место форсировка возбуждения, то получены следующие приращения напряжений в результате форсировки:

$$\begin{aligned}\Delta u_{d\phi}(t) &= -\frac{L_1 L_2 k_\phi \Delta u_\phi}{D_d''} \left(1 - (\omega_{qq} - \omega_{20})t + (\omega_b^2 - \omega_{20}\omega_{qq})\frac{t^2}{2!} + \dots \right); \\ \Delta u_{q\phi}(t) &= \frac{L_1 L_2 k_\phi \Delta u_\phi}{D_d''} \left(\omega_0 t - \omega_0 \omega_{qq} \frac{t^2}{2!} + \dots \right) + \frac{L_1 L_2 k_\phi \Delta u_\phi}{D_q'} \omega_0 \omega_{qq} \frac{t^2}{2!} + \dots,\end{aligned}\quad (7)$$

где

$$\begin{aligned}\omega_b^2 &= \omega_{qq}^2 - 2\omega_0^2; \quad \omega_{dd} = \frac{b_q}{a_q}; \quad \omega_{qq} = \frac{b_d}{a_d}; \\ a_d &= L_2 L_1^{-1} L_{d0}'' + L_{d0}'' + L_2; \quad b_d = L_2 L_1^{-1} L_{d0}'' (\omega_d'' + \omega_{20} - \omega_1) + L_2 \omega_{20} + L_{d0}'' \omega_d''; \\ a_q &= L_2 L_1^{-1} L_{q0}' + L_{q0}' + L_2; \quad b_q = L_2 L_1^{-1} L_{q0}' (\omega_q' + \omega_{20} - \omega_1) + L_2 \omega_{20} + L_{q0}' \omega_q'; \\ \omega_d'' &= R_{d0}'' (L_{d0}'')^{-1}; \quad \omega_q' = R_{q0}' (L_{q0}')^{-1}; \\ \omega_1 &= r_1 L_1^{-1}; \quad \omega_{20} = (r_2 + r_g) L_2^{-1};\end{aligned}$$

R_{d0}'' и R_{q0}' — члены при нулевой степени параметра p разложения в ряды Лорана операторных сопротивлений СГ $Z_d''(p)$ и $Z_q'(p)$, а L_{d0}'' и L_{q0}' — члены при первой положительной степени параметра p .

Из уравнений (2) и (7) имеем для $t=0^+$ (в первый момент после отключения) с учетом форсировки

$$\Delta u_d(0^+) = \frac{L_1 L_{d0}'' (r_g + \mu_1 L_0) i_{d2}^o}{L_1 L_{d0}'' + L_2 L_{d0}'' + L_1 L_2} - \frac{L_1 L_2 k_\phi \Delta u_\phi}{L_1 L_{d0}'' + L_2 L_{d0}'' + L_1 L_2}; \quad (8)$$

$$\Delta u_q(0^+) = \frac{L_1 L_{q0}' (r_g + \mu_1 L_0) i_{q2}^o}{L_1 L_{q0}' + L_2 L_{q0}' + L_1 L_2}. \quad (9)$$

Из приведенных выражений для $\Delta u_d(t)$ и $\Delta u_q(t)$ можно получить формулы для частного случая, когда от СГ отключается вся нагрузка. Для этого в уравнениях (2) и (7) надо устремить $L_1 \rightarrow \infty$, $r_1 \rightarrow \infty$. Тогда до отключения к СГ будет подключена только нагрузка Z_2 , которая и отключается.

Из уравнений (8) и (9) в этом случае получаем

$$\left. \begin{aligned}\Delta u_d(0^+) &= \frac{L_{d0}'' (r_g + \mu_1 L_0) i_{d2}^o}{L_{d0}'' + L_2} - \frac{L_2 k_\phi \Delta u_\phi}{L_{d0}'' + L_2}; \\ \Delta u_q(0^+) &= \frac{L_{q0}' (r_g + \mu_1 L_0) i_{q2}^o}{L_{q0}' + L_2}.\end{aligned}\right\} \quad (10)$$

Для сравнения приведем формулы, полученные автором ранее для случая подключения нагрузки $Z_2 = pL_2 + r_2$ к СГ, который работает с нагрузкой $Z_1 = pL_1 + r_1$. В момент подключения нагрузки происходит также форсировка напряжения. Формулы для $t = 0^+$ имеют вид

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_d(0^+) &= \frac{-L_1 L_{d0}'' u_d^0}{L_1 L_{d0}'' + L_2 L_{d0}'' + L_1 L_2} - \frac{L_1 L_2 k_\phi \Delta u_\phi}{L_1 L_{d0}'' + L_2 L_{d0}'' + L_1 L_2}; \\ \Delta u_q(0^+) &= -\frac{L_1 L_{q0}' u_q^0}{L_1 L_{q0}' + L_2 L_{q0}' + L_1 L_2}. \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Напряжения u_d^0 и u_q^0 являются напряжениями СГ при подключенной нагрузке Z_1 в стационарном режиме (до подключения нагрузки Z_2).

В уравнениях (7), (8), (10) и (11) коэффициент форсировки равен $k_\phi = M_d L_f^{-1} (1 - M_{d0}' (L_{D0}')^{-1})$; $M_{d0}' = M_d (1 - M_d L_f^{-1})$; $L_{D0}' = L_D - M_d^2 L_f^{-1}$, (12)

где M_d — взаимоиндуктивность по продольной оси, L_f и L_D — индуктивности обмотки возбуждения и демпферной клетки по продольной оси.

Мгновенные фазные напряжения СГ определяются известными формулами, которые без учета нулевых составляющих равны

$$\left. \begin{aligned} u_a(t) &= u_d(t) \cos \gamma + u_q(t) \sin \gamma; \\ u_b(t) &= u_d(t) \cos(\gamma - \rho) + u_q(t) \sin(\gamma - \rho); \\ u_c(t) &= u_d(t) \cos(\gamma + \rho) + u_q(t) \sin(\gamma + \rho), \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

где $\gamma = \omega_0 t + \gamma_0$; $\rho = \frac{2}{3} \pi$; γ_0 — угол между магнитной осью фазы a статора и продольной осью ротора в момент наброса (или сброса) нагрузки.

Полученные формулы позволяют сделать некоторые выводы:

1. Из (10) и (11) следует, что форсировка возбуждения при $t = 0^+$ непосредственно влияет только на напряжение СГ по продольной оси. Поэтому форсировкой возбуждения можно компенсировать скачки напряжения СГ из-за сброса (либо наброса) нагрузки в момент $t = 0^+$ только по продольной оси.

2. Как следует из выражения (12) коэффициента форсировки k_ϕ , демпферная клетка по продольной оси уменьшает величину k_ϕ и ослабляет эффект форсировки.

3. Уравнения для $\Delta u_d(0^+)$ и $\Delta u_q(0^+)$ показывают, что в случае отключения нагрузки (см (10)) в момент $t = 0^+$ на изменение напряжения влияют индуктивности СГ (L_{d0}'' и L_{q0}') и нагрузок (L_1 и L_2), активное сопротивление электрической дуги r_s (в момент $t = 0^+$), первая производная изменения индуктивности дуги $\mu_1 L_0$ и установившиеся значения токов i_{d2}^0 и i_{q2}^0 в от-

ключаемой цепи. Активные сопротивления обмоток СГ и нагрузок Z_1 и Z_2 не влияют на величины $\Delta u_d(0^+)$ и $\Delta u_q(0^+)$.

4. В случае наброса нагрузки Z_2 на СГ на изменение напряжения в момент $t = 0^+$ (см. (11)) влияют индуктивности СГ (L''_{d0} и L'_{q0}) и нагрузок (L_1 и L_2) и установившиеся значения напряжений u_d^0 и u_q^0 на клеммах СГ до наброса.

В заключение необходимо отметить, что полученные впервые аналитические выражения изменения напряжения СГ при сбросе и набросе нагрузки представляют определенный интерес для теории синхронных генераторов.

Государственный инженерный университет Армении

Հայաստանի ԳԱԱ ակադեմիկոս Գ. Լ. ԱՐԵՇՅԱՆ

Սինխրոն գեներատորի լարումների ցատկման և անկման բանաձևեր

Դիտարկված է բեռի տակ ավտոնոմ աշխատող դեմպֆերային վանդակներով սինխրոն գեներատոր:

Ստացված են բանաձևեր լարումների փոփոխությունների բեռի անջատման, կամ միացման դեպքում: Երկու դեպքում էլ հաշվի է առնվում լարումի արագացումը (ֆարսիրովկան): Բեռի անջատման ժամանակ առաջանում է էլեկտրական աղեղ:

Վերլուծումը ցույց է տալիս, որ էլեկտրական աղեղի պարամետրերը շատ մեծ աստիճանով ազդում են լարումների ցատկի վրա: Ստացված բանաձևերը սինխրոն գեներատորների տեսություն համար ունեն որոշակի հետաքրքրություն:

ЛИТЕРАТУРА – ՓՐԱՎԱՆՈՒԹՅՈՒՆ

¹ А.М.Залесский, Электрическая дуга отключения, М.-Л., ГЭИ, 1963. ² Г.Л.Аресян, НАН и ГИУ Армении, Технические науки, т.51, №2 (1998).