

УДК 621.3.011.7

**СХЕМНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В
СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ****Канов Л.Н., Устинов В.Г.**

Предложена схемная модель синхронного генератора на основе уравнений Парка-Горева. Исследованы переходные процессы симметричного короткого замыкания и наброса нагрузки с учетом автоматического регулирования возбуждения.

Проектирование судовых и промышленных электростанций обычно сопровождается анализом экстремальных режимов синхронных генераторов коротких замыканий, набросов нагрузки и сопутствующих им провалов напряжения, форсировки возбуждения и др. Ввиду сложности математического описания синхронных генераторов этот анализ часто проводится на основании эмпирических методик, не обеспечивающих точной информации об исследуемых процессах. В то же время с развитием теории электрических цепей появляется возможность непосредственного моделирования генераторов цепями с управляемыми источниками. Это позволяет исследовать переходные и экстремальные режимы методами теории цепей. Ниже предлагается схемная модель синхронного генератора, построенная на основе уравнений Парка-Горева и пригодная для исследования симметричных переходных процессов.

Подобные процессы в синхронных генераторах описываются

линейными дифференциальными уравнениями Парка-Горева,

например, [1]:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -\frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q - r i_d, & u_q &= -\frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d - r i_q, \\ u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f, & 0 &= \frac{d\psi_{1d}}{dt} + r_{1d} i_{1d}, & 0 &= \frac{d\psi_{1q}}{dt} + r_{1q} i_{1q} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где $u_d, u_q, \psi_d, \psi_q, i_d, i_q$ – соответственно составляющие фазного напряжения, потокосцепления тока генератора; u_f, ψ_f, i_f – напряжение, потокосцепление и ток возбуждения; $\psi_{1d}, i_{1d}, \psi_{1q}, i_{1q}$ – потокосцепления токи, соответственно продольной и поперечной демпферных обмоток; r, r_f, r_{1d}, r_{1q} – активные сопротивления фазы статора, обмотки

возбуждения и демпферных обмоток. Принимая общепринятое допущение о линейности магнитной цепи генератора, потокосцепления можно представить в виде

$$\left. \begin{aligned} \Psi_d &= x_{ad}i_f + x_{ad}i_d + x_d i_d, & \Psi_q &= x_{aq}i_q + x_q i_q, & \Psi_{1q} &= x_{1q}i_{1q} + x_{aq}i_q, \\ \Psi_f &= x_f i_f + x_{ad}i_d + x_{ad}i_d, & \Psi_{1d} &= x_{1d}i_{1d} + x_{ad}i_f + x_{ad}i_d \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

где при взаимной системе относительных единиц обозначена x_{ad}, x_{aq} – взаимные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям; x_d, x_q – продольные и поперечные индуктивные сопротивления; x_f, x_{1d}, x_{1q} – индуктивные сопротивления возбуждения и демпферных обмоток

Подставляя соотношения(2) в уравнения (1), получаем полное

линейное математическое описание симметричных переходных

режимов синхронного генератора

$$\left. \begin{aligned} u_d &= -x_{ad} \frac{di_d}{dt} - x_q i_q - x_{aq} i_{1q} - x_d \frac{di_d}{dt} - r i_d - x_{ad} \frac{di_f}{dt}, \\ u_q &= x_d i_d + x_{ad} i_{1d} + x_{ad} i_f - x_q \frac{di_q}{dt} - r i_q - x_{ad} \frac{di_{1q}}{dt}, \\ u_f &= x_{ad} \frac{di_d}{dt} + r_f i_f + x_f \frac{di_f}{dt} + x_{ad} \frac{di_{1d}}{dt}, \\ 0 &= x_{ad} \frac{di_f}{dt} + x_{1d} \frac{di_{1d}}{dt} + r_{1d} i_{1d} + x_{ad} \frac{di_d}{dt}, \\ 0 &= r_{1q} i_{1q} + x_{1q} \frac{di_{1q}}{dt} + x_{aq} \frac{di_q}{dt} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Переход к реальным фазным напряжениям и токам, например, фазы А

выполняется с помощью соотношений

$$u_A = u_d \cos \gamma + u_q \sin \gamma, \quad i_A = i_d \cos \gamma + i_q \sin \gamma, \quad (4)$$

где $\gamma = \omega t + \gamma_0$ – угол между осью обмотки А статора и продольной осью ротора, ω – круговая частота вращения ротора.

Физически каждое слагаемое в уравнениях (3) представляет собой напряжение. Поэтому, трактуя каждое уравнение (3) согласно второму закону Кирхгофа, можно получить схемную модель синхронного

генератора в виде пятиконтурной цепи. Для сокращения количества узлов (точек соединения элементов) на основании принципа дуальности можно заменить контуры узлами, напряжения – токами и наоборот, сопротивления – проводимостями. В результате получится схема, содержащая шесть узлов, включая один общий. Каждое слагаемое в

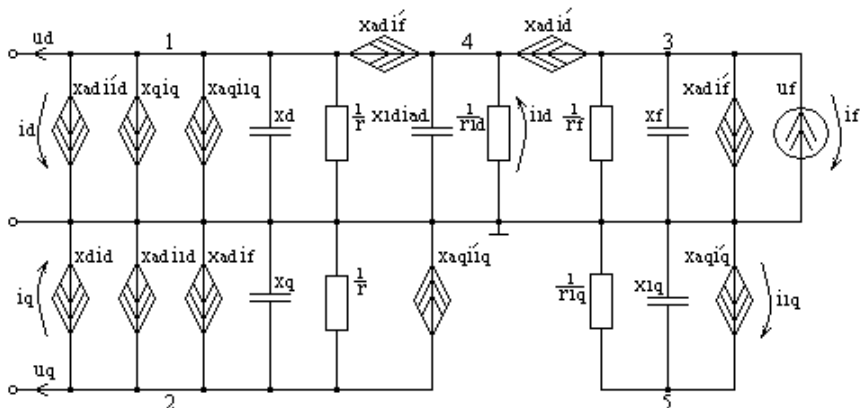


Рисунок 1 – Схемная модель синхронного генератора

уравнениях (3) будет теперь соответствовать току в проводимости или в емкости или же источнику тока, управляемому напряжением или его производной. Токи $i_d, i_q, i_f, i_{dq}, i_{dq}$ будут соответствовать потенциалам узлов относительно общего, напряжение u_f – независимому источнику тока, а напряжения u_d, u_q – токам в нагрузочных элементах. Построенная таким образом схема показана на рисунке 1. Номера узлов соответствуют порядку следования уравнений в системе (3).

Получим схемные модели распространенных нагрузок синхронных генераторов. Очевидно, в случае резистивной нагрузки r_H между узлами 1 и 0 и между узлами 2 и 0 в схеме (рисунок 1) необходимо подсоединить резисторы с сопротивлением $R=1/r_H$. Напряжение и ток индуктивной нагрузки L_H фазы А связаны дифференциальным соотношением $u_A = L_H \frac{di_A}{dt}$. Подставляя сюда i_A из выражения (4) и учитывая, что в

относительных единицах $\frac{d\gamma}{dt} = 1$, получаем:

$$u_A = (L_H \frac{di_d}{dt} + L_H i_q) \cos \gamma + (L_H \frac{di_q}{dt} - L_H i_d) \sin \gamma.$$

Сравнив последнее выражение с u_A из (4), найдем

$$u_d = L_H \frac{di_d}{dt} + L_H i_q, \quad u_q = L_H \frac{di_q}{dt} - L_H i_d.$$

Подставляя эти выражения в уравнения (3), получаем, что между узлами 1 и 0 и между узлами 2 и 0 нужно подсоединить по два элемента: источники тока, управляемые напряжениями, и конденсаторы (рисунок 2,а). Емкости конденсаторов и коэффициенты управляемых источников численно равны относительному реактивному сопротивлению нагрузки x_H .

Аналогично можно получить и схемную модель емкостной нагрузки (рисунок 2,б). Отметим, что для имитации режима холостого хода узлы 1 и 0 и узлы 2 и 0 в схеме на рисунке 1 нужно замкнуть накоротко. Токи в этих коротких замыканиях численно будут равны напряжениям холостого хода u_{dxx} и u_{qxx} . Для имитации режима короткого замыкания необходимо удалить из схемы нагрузочные элементы с тем, чтобы нагрузочные токи, численно равные напряжениям u_d и u_q , стали равны нулю.

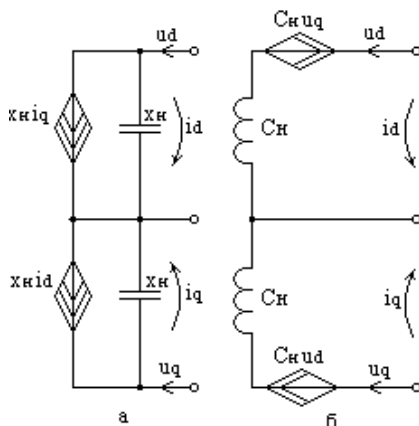


Рисунок 2 – Схемные модели нагрузки:
а – индуктивная; б – емкостная

В качестве иллюстрации были рассмотрены переходные процессы в синхронном генераторе мощностью 67 МВА с параметрами [1]: $x_d = 1$ о.е., $x_q = 0,6$ о.е., $x_{ad} = 0,85$ о.е., $x_{aq} = 0,45$ о.е., $r = 0,0083$ Ом = $0,005$ о.е., $r_f = 0,000655$ о.е., $x_f = 1,03$ о.е., $x_{1d} = 0,95$ о.е., $x_{1q} = 0,58$ о.е., $r_{1d} = 0,003$ о.е., $r_{1q} = 0,00184$ о.е.; номинальное напряжение и ток: $U_H = 10,5$ кВ, $I_H = 3,68$ кА.

Для имитации вывода генератора в стационарный режим холостого хода источник тока u_f в схеме на рисунке 1 устанавливался $0,00078$ о.е. Переходный процесс в схеме рассчитывался с нулевыми начальными условиями на конденсаторах и перемычками между узлами 1 и 0 и между узлами 2 и 0. После окончания переходного процесса ток в перемычке 2-0 достигал величины 1 о.е, что означало выход на режим холостого хода с номинальным напряжением. Длительность процесса составила около 16 с. Напряжение на конденсаторе x_f при этом достигало значения 1,18 о.е.

Для имитации переходного процесса симметричного короткого замыкания перемычки между узлами 1 и 0 и между узлами 2 и 0 удалялись

На рисунке 3 приведены результаты схемного моделирования фазного тока короткого замыкания и тока возбуждения (по оси абсцисс отложено относительное время $\tau = \omega t = 314t$). Как следует из графиков, короткое замыкание сопровождается значительным ударным током $I_y \approx 9$ о.е., который уже через 1,5 с снижается до установившегося уровня. Максимальный бросок тока в обмотке возбуждения достигает значения $I_B \approx 4$ о.е. (около 1,6 кА).

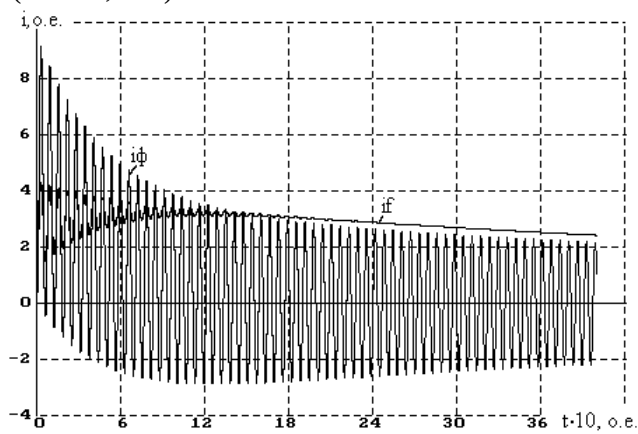


Рисунок 3 – Короткое замыкание синхронного генератора

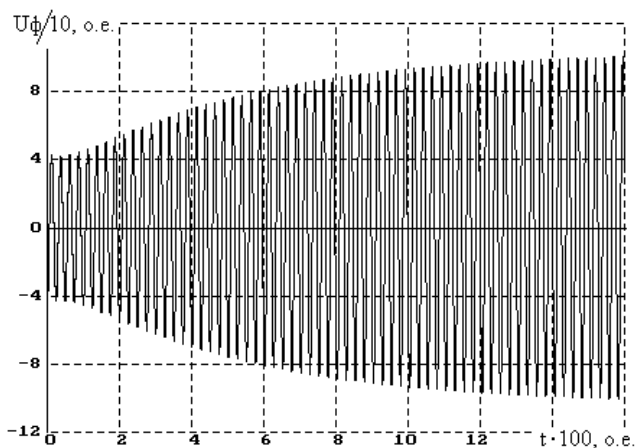


Рисунок 4 – Наброс нагрузки с имитацией действия автоматического регулятора возбуждения

Для исследования режима наброса нагрузки генератор выводился в стационарный нагрузочный режим при $r_H = 1$ о.е., напряжение возбуждения 0,00106 о.е. В этом режиме ток возбуждения (в схеме – напряжение на конденсаторе x_f) достигал значения 1,616 о.е., а составляющие фазного

напряжения – $u_d = -0,5115$ о.е., $u_q = 0,8571$ о.е. Наброс нагрузки осуществлялся уменьшением сопротивлений r_H до 0,1 о.е., действие автоматического регулятора возбуждения имитировалось релейным увеличением напряжения возбуждения до 0,008 о.е. На рисунке 4 показаны результаты схемного моделирования переходного процесса наброса нагрузки с одновременным увеличением напряжения возбуждения генератора (для наглядности период фазного напряжения на нагрузке показан увеличенным по сравнению с величиной $T = 0,02$ с в пять раз). График показывает наличие провала напряжения до уровня 0,4 о.е. и затем нарастания его в течение четырех секунд до номинального значения под действием автоматического регулятора напряжения.

Все результаты численных экспериментов по построенной схемной

модели синхронного генератора с хорошей точностью соответствуют

теоретическим данным, приведенным в [1], что подтверждает

достоверность схемного моделирования.

Библиографический список

1. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах / С.А. Ульянов — М., Л.: Энергия, 1964. — 704 с.

Поступила в редакцию 23.02.2001 г.