

Глава 5

Математическая модель синхронного генератора

§ 5.1. Уравнения синхронного генератора в собственных d, q осях

Для синхронной машины, имеющей на роторе обмотку возбуждения, произвольное количество $0 \dots n_d$ эквивалентных короткозамкнутых контуров в оси d и произвольное количество $0 \dots n_q$ эквивалентных короткозамкнутых контуров в оси q , уравнения Парка-Горева в именованных единицах можно записать в следующем виде:

$$\frac{d\Psi_d}{dt} + \omega\Psi_q + r_i i_d = -u_d, \quad (5.1)$$

$$\omega\Psi_d - \frac{d\Psi_q}{dt} - r_i i_q = u_q, \quad (5.2)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + r_r i_r = E_r, \quad (5.3)$$

$$\frac{d\Psi_{rdi}}{dt} + r_{rdi} i_{rdi} = 0, \quad i = 0 \dots n_d, \quad (5.4)$$

$$\frac{d\Psi_{rpk}}{dt} + r_{rpk} i_{rpk} = 0, \quad k = 0 \dots n_q, \quad (5.5)$$

$$\Psi_d = L_d i_d + M_{ad} i_r + M_{ad} \sum_{i=1}^{n_d} i_{rdi}, \quad (5.6)$$

$$\Psi_q = L_q i_q + M_{aq} \sum_{k=1}^{n_q} i_{rpk}, \quad (5.7)$$

$$\Psi_r = \frac{3}{2} M_{aa} i_d + L_r i_r + M_{ad} \sum_{i=1}^{n_d} i_{rdi}, \quad (5.8)$$

$$\Psi_{rdi} = \frac{3}{2} M_{ad} i_d + L_{rdi} i_{rdi} + M_{ad} i_r + M_{ad} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq i}}^{n_d} i_{rdj}, \quad i = 0 \dots n_d, \quad (5.9)$$

$$\Psi_{rpk} = \frac{3}{2} M_{aq} i_q + L_{rpk} i_{rpk} + M_{aq} \sum_{\substack{j=1, \\ j \neq k}}^{n_q} i_{rpj}, \quad k = 0 \dots n_q, \quad (5.10)$$

$$J \frac{d\Omega}{dt} = M_T - \frac{3}{2} (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d), \quad (5.11)$$

где r , r_r , r_{rdi} , r_{rqk} – активное сопротивление обмотки статора, обмотки возбуждения, i -го продольного и k -го поперечного демпферных контуров, L_d , L_q – индуктивности обмотки статора в продольной и поперечной осях, L_r , L_{rdi} , L_{rqk} – индуктивности обмотки возбуждения, i -го продольного и k -го поперечного эквивалентных демпферных контуров, M_{ad} – взаимная индуктивность любой пары контуров в оси d , M_{aq} – взаимная индуктивность любой пары контуров в оси q , E_r – напряжение возбуждения, $\Omega = \omega/p$ – угловая скорость вращения ротора, p – число пар полюсов машины.

Количество уравнений вида (5.4) и (5.9) определяется числом эквивалентных демпферных контуров в оси d машины, а уравнений вида (5.5) и (5.10) – числом демпферных контуров в оси q . Если n_d и/или n_q равно нулю, соответствующие уравнения и суммы токов демпферных контуров исключаются из системы уравнений.

Использовать систему уравнений (5.1)–(5.11), записанную в именованных единицах, можно, но неудобно. Затруднены сопоставление параметров машин различных типов и контроль их корректности, поскольку параметры электрических машин принято выражать в относительных единицах. Поэтому уравнения Парка-Горева рационально записывать и использовать в относительных единицах.

Выбор одной из известных систем относительных единиц [25, 33] определяется предпочтениями авторов. Каждая из систем обладает своими достоинствами и недостатками, но не имеет решающих преимуществ. На результаты расчетов переходных процессов сделанный выбор не влияет. В этой книге используется система относительных единиц А.А. Горева.

Базисные значения тока и напряжения контуров якоря (статора) машины равны амплитуде фазного тока и фазного напряжения

$$I_{\sigma} = \sqrt{2}I_{\phi.n}, \quad U_{\sigma} = \sqrt{2}U_{\phi.n},$$

базисное значение мощности статора равно номинальной полной мощности

$$S_{\sigma} = S_n = 3U_{\phi.n}I_{\phi.n} = \frac{3}{2}U_{\sigma}I_{\sigma},$$

базисное значение угловой скорости равно синхронной угловой скорости при номинальной частоте

$$\omega_{\sigma} = \omega_s = 2\pi f_n = 314,159 \text{ эл. радиан/с.}$$

Базисные значения прочих переменных в уравнениях статора определяются через базисные значения основных величин:

$$z_6 = \frac{U_6}{I_6}, \quad M_6 = \frac{S_6 p}{\omega_6}, \quad L_6 = \frac{z_6}{\omega_6}, \quad \Psi_6 = L_6 I_6 = \frac{U_6}{\omega_6},$$

где p – число пар полюсов.

Базисное значение тока обмотки возбуждения определяется по спрямленной в начале координат характеристике холостого хода машины, рис. 5.1, построенной в относительных единицах.

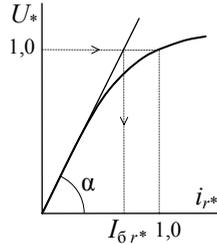


Рис. 5.1. Определение базисного значения тока роторных контуров

Ток возбуждения отнесен к номинальному току возбуждения на холостом ходе

$$i_{r*} = \frac{i_r}{i_{r \text{ х.х.н}}},$$

где $i_{r \text{ х.х.н}}$ – это такой ток возбуждения, при котором на холостом ходе генератора при номинальной угловой скорости вращения напряжение на выводах обмотки статора равно номинальному значению.

Графическое определение базисного тока I_{6r*} , выраженного в долях $i_{r \text{ х.х.н}}$, показано на рис. 5.1 стрелками, базисный ток в именованных единицах $I_{6r} = i_{r \text{ х.х.н}} I_{6r*}$. Если характеристика холостого хода задана в виде таблицы пар значений i_{r*}, U_* , можно найти тангенс угла наклона начального участка характеристики и вычислить

$$I_{6r} = \frac{i_{r \text{ х.х.н}}}{\text{tg} \alpha}. \quad (5.12)$$

Базисные значения токов демпферных контуров в осях d и q равны:

$$I_{6rd} = I_{6r}, \quad I_{6rq} = \frac{M_{ad}}{M_{aq}} I_{6r}.$$

При протекании базисного тока по какому-либо роторному контуру в режиме холостого хода при синхронной угловой скорости напряжение статора равно номинальному

$$U_{\text{H}} = \omega_s M_{ad} I_{\delta r}, \quad U_{\text{H}} = \omega_s M_{ad} I_{\delta rd}, \quad U_{\text{H}} = \omega_s M_{aq} I_{\delta rq}.$$

Базисные значения сопротивлений роторных контуров принимаются равными активным сопротивлениям контуров

$$z_{\delta r} = r_r, \quad z_{\delta rdi} = r_{rdi}, \quad z_{\delta rq} = r_r.$$

Базисные напряжения роторных контуров определяются как произведение базисного тока на базисные (активные) сопротивления контуров

$$U_{\delta r} = r_r I_{\delta r}, \quad U_{\delta rdi} = r_{rdi} I_{\delta rd}, \quad U_{\delta rq} = r_{rq} I_{\delta rq}.$$

Выполнив приведение уравнений статора и ротора к базисным условиям [23], можно получить следующую систему уравнений в относительных единицах:

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\Psi_d}{dt} + (1+s)\Psi_q + ri_d = -u_d, \quad (5.13)$$

$$(1+s)\Psi_d - \frac{1}{\omega_s} \frac{d\Psi_q}{dt} - ri_q = u_q, \quad (5.14)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r} (E_r - E_q), \quad (5.15)$$

$$\frac{d\Psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}} E_{rqi}, \quad i = 0 \dots n_d, \quad (5.16)$$

$$\frac{d\Psi_{rqk}}{dt} = \frac{1}{T_{rqk}} E_{rdk}, \quad k = 0 \dots n_q, \quad (5.17)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_J} (M_\tau - M_e), \quad (5.18)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s (s - s_v), \quad (5.19)$$

$$\Psi_d = x_d i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}, \quad (5.20)$$

$$\Psi_q = x_q i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk}, \quad (5.21)$$

$$\Psi_r = \frac{x_{ad}^2}{x_r} i_d + E_q + \frac{x_{ad}}{x_r} \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}, \quad (5.22)$$

$$\Psi_{rdi} = \frac{x_{ad}^2}{x_{rdi}} i_d + E_{rqi} + \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} \left(E_q + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_d} E_{rqi} \right), \quad i = 0 \dots n_d, \quad (5.23)$$

$$\Psi_{rpk} = \frac{x_{aq}^2}{x_{rpk}} i_q - E_{rpk} - \frac{x_{aq}}{x_{rpk}} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n_q} E_{rdj}, \quad k = 0 \dots n_q, \quad (5.24)$$

$$M_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d. \quad (5.25)$$

где $x_d = x_{ad} + x_s$, $x_q = x_{aq} + x_s$ – синхронные индуктивные сопротивления машины по продольной и поперечной осям,

x_{ad} , x_{aq} – реактивные сопротивления реакции статора (якоря) по продольной и поперечной осям,

x_s – реактивное сопротивление рассеяния статора,

$x_r = x_{ad} + x_{sr}$, $x_{rdi} = x_{ad} + x_{srdi}$, $x_{rpk} = x_{aq} + x_{srpk}$ – реактивные сопротивления обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров,

x_{srdi} , x_{srpk} – реактивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров,

$$E_q = \frac{\omega_s M_{ad} i_r}{\omega_s M_{ad} I_{\delta r}}, \quad E_{rqi} = \frac{\omega_s M_{ad} i_{rdi}}{\omega_s M_{ad} I_{\delta rd}}, \quad E_{rpk} = -\frac{\omega_s M_{aq} i_{rpk}}{\omega_s M_{aq} I_{\delta rq}} - \text{ЭДС, ин-}$$

дуктируемые в статоре магнитным полем токов роторных контуров при синхронной частоте вращения ротора,

$T_r = \frac{L_r}{r_r} = \frac{x_r}{\omega_s r_r}$ – постоянная времени обмотки возбуждения при прочих разомкнутых контурах, с,

$T_{rdi} = \frac{L_{rdi}}{r_{rdi}} = \frac{x_{rdi}}{\omega_s r_{rdi}}$, $T_{rpk} = \frac{L_{rpk}}{r_{rpk}} = \frac{x_{rpk}}{\omega_s r_{rpk}}$ – постоянные времени демп-

ферных контуров при прочих разомкнутых контурах, с,

$T_J = J \frac{\omega_s^2}{S_o P^2}$ – инерционная постоянная генерирующего агрегата, с.

Уравнение (5.19) включено в систему уравнений для определения угла δ между собственными осями генератора и общими осями d_v , q_v , имеющими скольжение s_v относительно синхронных осей.

Наряду с исходной формой записи (5.13)–(5.25) уравнений иногда удобнее модифицированная форма записи с использованием коэффи-

циентов магнитной связи обмотки возбуждения и эквивалентных демпферных контуров со статорными контурами

$$\mu_d = \frac{x_{ad}^2}{x_r x_d}, \quad \mu_{rdi} = \frac{x_{ad}^2}{x_{rdi} x_d}, \quad \mu_{rqk} = \frac{x_{aq}^2}{x_{rqk} x_q},$$

декрементов роторных контуров

$$\rho_r = \frac{r_r}{x_r} = \frac{1}{\omega_s T_r}, \quad \rho_{rdi} = \frac{r_r}{x_{rdi}} = \frac{1}{\omega_s T_{rdi}}, \quad \rho_{rqk} = \frac{r_r}{x_{rqk}} = \frac{1}{\omega_s T_{rqk}},$$

и магнитных параметров

$$g_r = \frac{x_{ad}}{x_r}, \quad g_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}}, \quad g_{rqk} = \frac{x_{aq}}{x_{rqk}}.$$

В модифицированной форме записи уравнения роторных контуров принимают вид:

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \omega_s \rho_r (E_r - E_q), \quad (5.26)$$

$$\frac{d\Psi_{rdi}}{dt} = -\omega_s \rho_{rdi} E_{rqi}, \quad (5.27)$$

$$\frac{d\Psi_{rqk}}{dt} = \omega_s \rho_{rqk} E_{rdk}, \quad (5.28)$$

$$\Psi_r = \mu_d x_d i_d + E_q + g_r \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}, \quad (5.29)$$

$$\Psi_{rdi} = \mu_{rdi} x_d i_d + E_{rqi} + g_{rdi} \left(E_q + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_d} E_{rqi} \right), \quad (5.30)$$

$$\Psi_{rqk} = \mu_{rqk} x_q i_q - E_{rdki} - g_{rqk} \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n_q} E_{rdj}. \quad (5.31)$$

Выбранная форма записи уравнений генератора имеет следующие особенности. Вместо токов роторных контуров в уравнениях фигурируют новые переменные – ЭДС, индуцируемые этими токами в обмотке статора. ЭДС с индексом q пропорциональны токам роторных контуров в оси d , ЭДС с индексом d пропорциональны токам роторных контуров в оси q . Новые переменные обеспечивают естественную связь динамической модели генератора с представлением генератора ЭДС за поперечной реактивностью и с векторной диаграммой генератора, которые используются при расчете и анализе установившихся режимов.

В определении ЭДС $E_{rdk} = -\omega_s M_{aq} i_{rqk}$ знак минус введен потому, что в соответствии с принятыми соглашениями, § 4.2, переменные, являющиеся проекциями изображающих векторов на координатные оси, имеют знак, совпадающий со знаком направления оси. Тогда при переходе к комплексной форме записи (с собственными d, q осями машины совмещаются оси комплексной плоскости, изображающий вектор становится комплексом) и проведении вычислений в комплексных числах мнимая часть комплекса $\dot{E}_{rk} = E_{rqk} + jE_{rdk}$ имеет правильный знак, § 1.1.

В установившихся режимах при вращении ротора с угловой скоростью $\omega = \omega_s$ выполняется равенство $E_r = E_q$, что обеспечивает естественное согласование уравнений машины с уравнениями системы возбуждения и автоматического регулятора возбуждения, параметры которых выражаются через напряжение возбуждения на холостом ходе или через номинальное напряжение возбуждения.

§ 5.2. Учет насыщения стали

При моделировании генераторов обычно ограничиваются учетом насыщения стали по пути магнитного потока взаимной индукции, пренебрегая насыщением стали от магнитных потоков рассеяния [25]. Учет совместного влияния магнитных потоков взаимной индукции и магнитных потоков рассеяния на насыщение стали неоправданно усложняет модель.

Недостаток идеализированной модели позволяет устранить упрощенная методика учета насыщения стали по пути магнитного потока взаимной индукции, предложенная М.Л. Левинштейном [25, 28], которая в качестве дополнительной исходной информации о машине использует лишь характеристику холостого хода, причем, если последняя неизвестна, может быть использована нормальная характеристика холостого хода для гидрогенераторов или турбогенераторов [1]. Более сложные методы учета насыщения, хотя и более точные, например [29], не нашли применения в программах расчета переходных процессов в энергосистемах и узлах нагрузки.

Для учета зависимости коэффициентов взаимной индукции и соответствующих реактивностей от насыщения стали в исходные уравнения машины вводятся специальные переменные параметры \mathfrak{F}_d и \mathfrak{F}_q , учитывающие насыщение стали по осям d и q . Сами же коэффициенты и реактивности взаимной индукции являются постоянными

параметрами, не зависящими от насыщения, и определяются для идеализированной, ненасыщенной машины. Параметры насыщения ϑ_d и ϑ_q являются функцией ЭДС за реактивностью рассеяния статора

$$\dot{E}_\delta = E_{\delta q} + jE_{\delta d}, \quad (5.32)$$

$$E_{\delta q} = x_{ad}i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi}, \quad (5.33)$$

$$E_{\delta d} = - \left(x_{aq}i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk} \right). \quad (5.34)$$

Эта ЭДС связана с результирующим магнитным полем в воздушном зазоре и называется также внутренней ЭДС машины или ЭДС воздушного зазора.

Для неявнополюсной машины с равномерным зазором полагают параметры насыщения по обеим осям одинаковыми

$$\vartheta_d = \vartheta_q = \vartheta = \vartheta(E_\delta), \quad E_\delta = \sqrt{E_{\delta q}^2 + E_{\delta d}^2}. \quad (5.35)$$

Для явнополюсной машины с большим воздушным зазором в оси q , создающим значительное магнитное сопротивление, учитывается насыщение только главной магнитной цепи в оси d , поэтому полагают, что $\vartheta_q = 1$, а параметр насыщения ϑ_d зависит от поперечной составляющей ЭДС за реактивностью рассеяния статора

$$\vartheta_d = \vartheta_d(E_{\delta q}). \quad (5.36)$$

Функцию $\vartheta = \vartheta(E_\delta)$ или $\vartheta_d = \vartheta_d(E_{\delta q})$ можно назвать характеристикой насыщения стали машины. Она определяется по характеристике холостого хода машины.

Для учета насыщения стали необходимо преобразовать алгебраические уравнения (5.20)÷(5.24) таким образом, чтобы в них фигурировали продольная (5.33) и поперечная (5.34) составляющие ЭДС за реактивностью рассеяния статора, поскольку эта ЭДС необходима для определения параметра насыщения по характеристике (5.35) или (5.36), и ввести в уравнения машины параметры насыщения.

Потокоцепления контуров статора можно записать в виде

$$\Psi_d = x_s i_d + x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} = x_s i_d + E_{\delta q}, \quad (5.37)$$

$$\Psi_q = x_s i_q + x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk} = x_s i_q - E_{\delta d}. \quad (5.38)$$

Потокосцепления контуров ротора можно преобразовать следующим образом:

$$\begin{aligned}\Psi_r &= \frac{x_{ad}^2}{x_r} i_d + E_q + \frac{x_{ad}}{x_r} \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} = \frac{x_{ad}}{x_r} \left(x_{ad} i_d + \frac{x_r}{x_{ad}} E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} + E_q - E_q \right) = \\ &= \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q,\end{aligned}\quad (5.39)$$

$$\begin{aligned}\Psi_{rdi} &= \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} \left(x_{ad} i_d + \frac{x_{rdi}}{x_{ad}} E_{rqi} + E_q + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{n_d} E_{rqi} + (E_{rqi} - E_{rqi}) \right) = \\ &= \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{sr di}}{x_{rdi}} E_{rqi},\end{aligned}\quad (5.40)$$

$$\begin{aligned}\Psi_{rqi} &= \frac{x_{aq}}{x_{rqi}} \left(x_{aq} i_q - \frac{x_{rqi}}{x_{aq}} E_{rdk} - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^{n_q} E_{rdj} - (E_{rdk} - E_{rdk}) \right) = \\ &= -\frac{x_{aq}}{x_{rqi}} E_{\delta d} - \frac{x_{sr qi}}{x_{rqi}} E_{rdk}.\end{aligned}\quad (5.41)$$

Ввод параметров насыщения в уравнения машины рассмотрим на примере обмотки возбуждения. При учете насыщения уравнение (5.8) можно записать в виде

$$\Psi_r = \frac{3}{2} \overline{M}_{ad} i_d + \overline{L}_r i_r + \overline{M}_{ad} \sum_{i=1}^{n_d} i_{rdi}, \quad (5.42)$$

где черточка сверху у коэффициентов взаимной и самоиндукции означает, что они зависят от насыщения стали. Определим параметр насыщения по продольной оси как отношение насыщенного коэффициента взаимной индукции к ненасыщенному

$$\vartheta_d = \frac{\overline{M}_{ad}}{M_{ad}} \quad (5.43)$$

и представим

$$\overline{M}_{ad} = \vartheta_d M_{ad}, \quad \overline{L}_r = L_{sr} + \overline{M}_{ad} = L_{sr} + \vartheta_d M_{ad}, \quad (5.44)$$

принимая допущение, что индуктивность рассеяния обмотки возбуждения не зависит от насыщения стали по пути магнитного потока взаимной индукции. Подстановка (5.44) в (5.42) вводит параметр насыщения в уравнение для потокосцепления обмотки возбуждения. Подставляя потокосцепление в уравнение (5.3), получим развернутое дифференциальное уравнение контура возбуждения

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} \mathfrak{G}_d M_{ad} i_d + L_{sr} i_r + \mathfrak{G}_d M_{ad} i_r + \mathfrak{G}_d M_{ad} \sum_{i=1}^{n_d} i_{rdi} \right) + r_r i_r = E_r. \quad (5.45)$$

Далее:

- умножим уравнение (5.45) на $\frac{\omega_s M_{ad}}{L_r}$, где M_{ad} и L_r – постоянные параметры идеализированной машины,
- введем вместо тока контура возбуждения i_r и тока i -го демпферного контура новые переменные $E_q = \omega_s M_{ad} i_r$, $E_{rqi} = \omega_s M_{ad} i_{rdi}$ – ЭДС, индуцируемые в контурах статора магнитным полем контура возбуждения и демпферных контуров идеализированной машины,
- приведем уравнение к относительным единицам А.А. Горева, разделив левую часть уравнения на U_{δ} , а правую часть – на

$$\omega_s M_{ad} \frac{U_{\delta r}}{r_r} = U_{\delta}.$$

После преобразований уравнения обмотки возбуждения принимают вид

$$\frac{d\Psi_r}{dt} + \frac{1}{T_r} E_q = \frac{1}{T_r} E_r,$$

$$\Psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} \mathfrak{G}_d \left(x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} \right) + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q,$$

где $E_{\delta q} = \mathfrak{G}_d \left(x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} \right)$.

После ввода параметра насыщения в уравнения обмотки возбуждения дифференциальное уравнение (5.15) и выражение для потокосцепления (5.39) не изменились. Изменилось лишь выражение для поперечной составляющей ЭДС за реактивностью рассеяния статора (5.33), в него теперь входит параметр насыщения \mathfrak{G}_d . Аналогично и с таким же результатом параметры насыщения вводятся в уравнения остальных контуров ротора по осям d и q и в уравнения статора. Выражение для продольной составляющей ЭДС за реактивностью рассеяния принимает вид

$$E_{\delta d} = -\mathfrak{G}_q \left(x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk} \right).$$

Следовательно, форма записи уравнений насыщенной машины остается такой же, как идеализированной машины, изменяются лишь выражения для определения d, q составляющих ЭДС за реактивностью рассеяния статора. В систему уравнений машины необходимо включить уравнения для определения \dot{E}_δ и характеристику насыщения стали.

Таким образом, модель генератора в собственных d, q осях, удовлетворяющая требованиям § 4.3 и пригодная для проведения расчетов переходных процессов в энергосистемах и в узлах нагрузки, принимает вид:

$$\frac{1}{\omega_s} \frac{d\Psi_d}{dt} + (1 + \omega_s)\Psi_q + ri_d = -u_d, \quad (5.46)$$

$$(1 + s)\Psi_d - \frac{1}{\omega_s} \frac{d\Psi_q}{dt} - ri_q = u_q, \quad (5.47)$$

$$\frac{d\Psi_r}{dt} = \frac{1}{T_r}(E_r - E_q), \quad (5.48)$$

$$\frac{d\Psi_{rdi}}{dt} = -\frac{1}{T_{rdi}} E_{rqi}, \quad i = 0 \dots n_d, \quad (5.49)$$

$$\frac{d\Psi_{rpk}}{dt} = \frac{1}{T_{rpk}} E_{rdk}, \quad k = 0 \dots n_q, \quad (5.50)$$

$$\frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_J}(M_\tau - M_e), \quad (5.51)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_s(s - s_v), \quad (5.52)$$

$$\Psi_d = x_s i_d + E_{\delta q}, \quad (5.53)$$

$$\Psi_q = x_s i_q - E_{\delta d}, \quad (5.54)$$

$$\Psi_r = \frac{x_{ad}}{x_r} E_{\delta q} + \frac{x_{sr}}{x_r} E_q, \quad (5.55)$$

$$\Psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q} + \frac{x_{sr di}}{x_{rdi}} E_{rqi}, \quad i = 0 \dots n_d, \quad (5.56)$$

$$\Psi_{rpk} = -\frac{x_{aq}}{x_{rpk}} E_{\delta d} - \frac{x_{srpk}}{x_{rpk}} E_{rdk}, \quad k = 0 \dots n_q, \quad (5.57)$$

$$E_{\delta q} = \mathfrak{G}_d \left(x_{ad} i_d + E_q + \sum_{i=1}^{n_d} E_{rqi} \right), \quad (5.58)$$

$$E_{\delta d} = -\vartheta_q \left(x_{aq} i_q - \sum_{k=1}^{n_q} E_{rdk} \right), \quad (5.59)$$

$$M_e = \Psi_d i_q - \Psi_q i_d = E_{\delta q} i_q + E_{\delta d} i_d, \quad (5.60)$$

для неявнополюсной машины

$$\vartheta_d = \vartheta_q = \vartheta = \vartheta(E_{\delta}), \quad E_{\delta} = \sqrt{E_{\delta q}^2 + E_{\delta d}^2}, \quad (5.61)$$

для явнополюсной машины

$$\vartheta_q = 1, \quad \vartheta_d = \vartheta_d(E_{\delta q}). \quad (5.62)$$

Характеристику насыщения стали машины можно построить по заданной характеристике холостого хода, рис. 5.1. В установившемся режиме холостого хода ток статора и токи демпферных контуров равны нулю, ЭДС, индуцируемые в контурах статора магнитным полем токов демпферных контуров, тоже равны нулю, поэтому

$$\Psi_d = E_{\delta q} = \vartheta E_q, \quad \Psi_q = 0,$$

и статорные уравнения машины в установившемся режиме холостого хода принимают вид

$$\Psi_d = \vartheta E_q = U_q = U, \quad U_d = 0,$$

откуда

$$\vartheta = \frac{U}{E_q}.$$

В относительных единицах А.А. Горева у идеализированной машины синхронная ЭДС E_q численно равна току возбуждения, отнесенному к базисному току ротора. Учитывая соотношение (5.12), можно определить

$$E_q = \frac{E_{q[\text{и.е.}]}}{U_{\delta}} = \frac{\omega_s M_{ad} i_r}{\omega_s M_{ad} I_{\delta r}} = \frac{i_r}{\frac{i_r \times \text{х.н.}}{\text{tg} \alpha}} = \text{tg} \alpha i_{r*}.$$

Следовательно, зная характеристику холостого хода, заданную как таблицу пар значений i_{r*}, U_* , можно построить характеристику насыщения $\vartheta = f(E_{\delta})$, представляющую собой таблицу пар значений E_{δ}, ϑ , по формулам:

$$\vartheta = \frac{U}{E_q} = \frac{U_*}{\text{tg} \alpha i_{r*}}, \quad (5.63)$$

$$E_{\delta} = \vartheta E_q = \vartheta \text{tg} \alpha i_{r*}. \quad (5.64)$$

При выполнении расчетов переходных процессов характеристику насыщения можно аппроксимировать семейством парабол, ортогональными многочленами и др., либо хранить характеристику насыщения в виде таблицы, а для нахождения промежуточных значений параметра насыщения применить итерационно-интерполяционный метод Эйткена [34].

§ 5.3. Упрощенные уравнения синхронного генератора

При решении практических задач уравнения синхронной машины можно упростить. В [25] показано, что в расчетах электромеханических переходных процессов из уравнений статорных контуров (5.46) и (5.47) можно исключить трансформаторные ЭДС $\frac{d\Psi_d}{dt}$ и $\frac{d\Psi_q}{dt}$. При этом нагрузка и статические сетевые элементы электрической схемы тоже должны моделироваться упрощенно, из их уравнений также исключаются трансформаторные ЭДС. Современные исследования [35] подтверждают правомерность применения упрощенных уравнений Парка-Горева в расчетах динамики энергосистем.

Исключение трансформаторных ЭДС из статорных уравнений вращающихся машин и из уравнений других элементов электрической схемы превращает дифференциальные уравнения в алгебраические, что значительно упрощает моделирование многомашинных электрических схем.

Однако упрощенная модель вращающихся машин не полностью отображает свойства самих объектов. Упрощенная модель теряет способность воспроизводить электромагнитные переходные процессы, возникающие при коммутациях в схеме, поэтому токи статора генераторов, двигателей и токи сетевых элементов, а также напряжения в узлах схемы при возникновении коротких замыканий, включения/отключения линий теперь могут изменяться скачком.

В решении упрощенной системы уравнений генератора при коммутациях в сети отсутствуют свободные составляющие токов статора и, следовательно, не воспроизводятся ударные токи и моменты на валу, а также не учитывается асинхронный момент, возникающий при вращении ротора относительно неподвижного в пространстве магнитного поля, созданного апериодическими токами статора. Ввиду значительной инерции вращающихся масс генерирующих агрегатов и быстрого затухания свободных составляющих токов статора эти моменты не оказывают заметного влияния на движение агрегата. Апериодиче-

скую составляющую электромагнитного момента рекомендуется учитывать для капсульных гидрогенераторов при возникновении близких коротких замыканий.

При записи упрощенных статорных уравнений генератора d, q составляющие тока и напряжения статора принято обозначать прописными буквами [25]. Упрощенные уравнения имеют вид

$$(1 + s)\Psi_q + rI_d = -U_d, \quad (5.65)$$

$$(1 + s)\Psi_d - rI_q = U_q. \quad (5.66)$$

Обычно не учитывают также активные сопротивления элементов, полагая $r = 0$ ввиду его малости.

При переходе к упрощенным уравнениям рекомендуется [25] для взаимной компенсации погрешностей одновременно с исключением трансформаторных ЭДС пренебречь также и ЭДС скольжения $s\Psi_d$ и $s\Psi_q$. Тогда упрощенные статорные уравнения генератора приобретают предельно простой вид без поперечных связей по току

$$\Psi_q = -U_d, \quad (5.67)$$

$$\Psi_d = U_q. \quad (5.68)$$

Уравнения (5.67), (5.68) применимы, если рассматриваются процессы с малыми отклонениями частоты от номинальной, поскольку отбрасывание ЭДС скольжения предполагает, что индуктивные сопротивления машины и ЭДС, индуктируемые в статоре магнитным полем токов ротора, не зависят от частоты в энергосистеме. Поэтому для расчета переходных процессов со значительными отклонениями частоты (большой дефицит генерации в энергосистеме с отключением нагрузки действием АЧР, частотный пуск, прием двигательной нагрузки автономным генератором соизмеримой мощности и др.) эта рекомендация не пригодна, наоборот, учет ЭДС скольжения становится обязательным.

При практической реализации модели целесообразно уравнения генератора записать в виде (5.65), (5.66) и предусмотреть выбор типа упрощенных уравнений. Для перехода к уравнениям (5.67), (5.68) достаточно в уравнениях (5.65) и (5.66) положить $s = 0$ и $r = 0$.

§ 5.4. Синхронная машина как источник ЭДС в собственных d, q осях

При использовании упрощенных уравнений статора генераторов, нагрузок и сетевых элементов возникает необходимость расчета мгновенного электрического режима схемы на шаге или подшаге численного интегрирования. Вначале активные узловыe элементы (генераторы и двигатели, ротор которых описывается дифференциальными уравнениями) необходимо представить реальными источниками ЭДС (тока) и преобразовать уравнения источников от собственных осей к общим осям. Зная текущие параметры источников ЭДС, можно определить напряжения в узлах схемы в общих осях методом эквивалентных преобразований, § 2.3, или решив систему узловых уравнений методом Гаусса. Зная напряжения в узлах и преобразовав их, если требуется, к собственным осям, можно рассчитать режим узловых элементов и определить производные интегрируемых переменных. При необходимости, например, для противоаварийной автоматики, рассчитывается режим некоторых или всех ветвей схемы.

Для представления генератора источником ЭДС нужно выполнить следующие преобразования:

1. Из уравнений для потокоцеплений контуров ротора (5.55), (5.56) и (5.57) выразить ЭДС E_q , E_{rqi} , E_{rdk} и подставить их в уравнения (5.58), (5.59) для $E_{\delta q}$ и $E_{\delta q}$.
2. Полученные выражения для $E_{\delta q}$ и $E_{\delta q}$ подставить в уравнения (5.53), (5.54) для Ψ_d и Ψ_q .
3. Развернутые выражения для Ψ_d и Ψ_q подставить в упрощенные статорные уравнения (5.65), (5.66) и преобразовать эти уравнения к форме записи уравнений для источника ЭДС.

Из-за несимметрии генератора по осям d и q источник ЭДС, замещающий генератор, можно представить в общем виде матричным уравнением

$$\begin{Bmatrix} E_{qe} \\ jE_{de} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} U_q \\ jU_d \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} r & jx_{de} \\ jx_{qe} & r \end{Bmatrix} \times \begin{Bmatrix} I_q \\ jI_d \end{Bmatrix} \quad (5.69)$$

или в виде двух уравнений

$$E_{qe} = U_q + rI_q - x_{de}I_d, \quad (5.70)$$

$$E_{de} = U_d + x_{qe}I_q + rI_d. \quad (5.71)$$

Преобразования дают следующие выражения для d, q составляющих эквивалентной ЭДС, индуцируемой в контурах статора магнитным полем токов роторных контуров,

$$E_{qe} = (1+s) \frac{x_{ad}''}{x_{ad}} \left(\frac{x_r}{x_{sr}} \Psi_r + \sum_{i=1}^{i=n_d} \frac{x_{rdi}}{x_{sr di}} \Psi_{rdi} \right), \quad (5.72)$$

$$E_{de} = -(1+s) \frac{x_{aq}''}{x_{aq}} \sum_{k=1}^{k=n_q} \frac{x_{rqk}}{x_{srqk}} \Psi_{rqk}, \quad (5.73)$$

и эквивалентных индуктивных сопротивлений генератора по осям d и q

$$x_{de} = (1+s)(x_s + x_{ad}''), \quad (5.74)$$

$$x_{qe} = (1+s)(x_s + x_{aq}''), \quad (5.75)$$

где $x_{ad}'' = \frac{1}{\frac{1}{\mathfrak{G}_d x_{ad}} + \frac{1}{x_{sr}} + \sum_{i=1}^{n_d} \frac{1}{x_{sr di}}}$, $x_{aq}'' = \frac{1}{\frac{1}{\mathfrak{G}_q x_{aq}} + \sum_{k=1}^{n_q} \frac{1}{x_{srqk}}}$ – сверхпере-

ходные сопротивления взаимной индукции по осям d и q .

При использовании упрощенных статорных уравнений (5.67), (5.68) в уравнениях (5.70)÷(5.75) следует положить $r=s=0$. Тогда генератор можно представить сверхпереходной ЭДС за сверхпереходным сопротивлением:

$$E_{qe} = E_q'' = x_{ad}'' \left(\frac{x_r}{x_{ad}} \Psi_r \frac{1}{x_{sr}} + \sum_{i=1}^{n_d} \left(\frac{x_{rdi}}{x_{ad}} \Psi_{rdi} \frac{1}{x_{sr di}} \right) \right), \quad (5.76)$$

$$x_{de} = x_d'' = x_s + x_{ad}'', \quad (5.77)$$

$$E_{de} = E_d'' = x_{aq}'' \sum_{i=1}^{n_d} \left(-\frac{x_{rqk}}{x_{aq}} \Psi_{rqk} \frac{1}{x_{srqk}} \right), \quad (5.78)$$

$$x_{qe} = x_q'' = x_s + x_{aq}''. \quad (5.79)$$

Уравнениям (5.76), (5.77), соответствует схема замещения генератора в оси d , представленная на рис. 5.2, *а*, а уравнениям (5.78), (5.79) соответствует схема замещения генератора в оси q , рис. 5.2, *б*.

При переходе к упрощенным статорным уравнениям вращающихся машин возникает проблема симметризации источника ЭДС, замещающего генератор, так как несимметричный по осям d и q источник ЭДС (5.69)÷(5.75) или (5.76)÷(5.79) нельзя непосредственно использовать в расчете мгновенного электрического режима схемы.

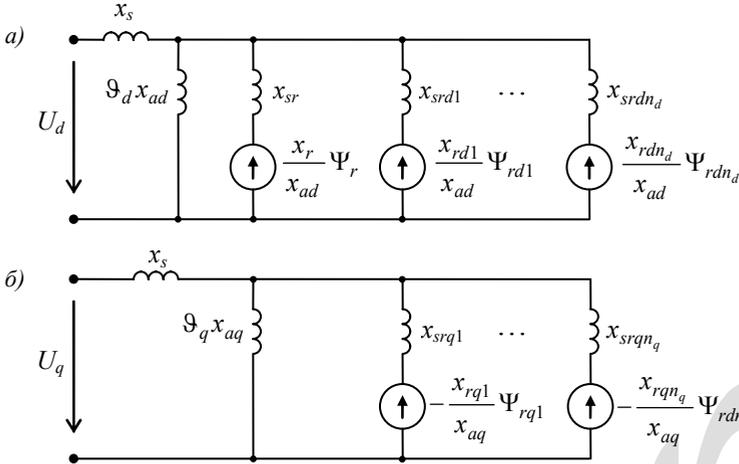


Рис. 5.2. Схемы замещения синхронного генератора в осях d и q

Обычно источник ЭДС симметризируют упрощенно, сверхпереходные реактивности генератора по продольной и поперечной оси принимают одинаковыми, равными среднему значению

$$x'' = \frac{x_d'' + x_q''}{2}.$$

Тогда матричный источник ЭДС (5.69) становится комплексным

$$\dot{E}_e = \dot{U} + (r + jx'')\dot{I},$$

его можно использовать в расчете мгновенного электрического режима схемы. Этот способ симметризации несовместим с многоконтурной схемой замещения ротора генератора.

Имеется возможность сохранить несимметрию генератора по продольной и поперечной осям и не искажать демпферную систему генератора, если в расчете мгновенного электрического режима схемы представить генератор ЭДС за реактивностью рассеяния статора. Из уравнений (5.65), (5.66) с учетом (5.53) и (5.54) можно выразить

$$(1+s)E_{\delta q} = U_q - (1+s)x_s I_d + r I_q, \quad (5.80)$$

$$(1+s)E_{\delta d} = U_d + (1+s)x_s I_q + r I_d. \quad (5.81)$$

Следовательно, генератор можно рассматривать как источник ЭДС

$$\dot{E}_\delta = \frac{\dot{U} + Z_s \dot{I}}{1+s}, \quad (5.82)$$

$$Z_s = r + jx_s(1+s). \quad (5.83)$$

Подставив реактивности (5.74), (5.75) в уравнения (5.70), (5.71), запишем эти уравнения в виде

$$E_{qe} = U_q - (1+s)x_s I_d + r I_q - (1+s)x''_{ad} I_d = (1+s)E_{\delta q} - (1+s)x''_{ad} I_d,$$

$$E_{de} = U_d + (1+s)x_s I_q + r I_d + (1+s)x''_{aq} I_q = (1+s)E_{\delta d} + (1+s)x''_{aq} I_q$$

и выразим d , q составляющие ЭДС за реактивностью рассеяния статора через составляющие эквивалентной ЭДС генератора (5.72) и (5.73)

$$E_{\delta q} = \frac{E_{qe}}{1+s} + x''_{ad} I_d, \quad (5.84)$$

$$E_{\delta d} = \frac{E_{de}}{1+s} - x''_{aq} I_q. \quad (5.85)$$

Значение тока статора для определения ЭДС за реактивностью рассеяния статора можно брать с предыдущего шага интегрирования. В отличие от ЭДС E_{qe} и E_{de} , которые являются непрерывными функциями, поскольку определяются потокосцеплениями роторных контуров, ЭДС $E_{\delta q}$ и $E_{\delta d}$ зависят также от тока статора и могут изменяться скачком при коммутациях в схеме. При использовании метода численного интегрирования без автоматического выбора шага после коммутации в схеме необходимо итеративно уточнить мгновенный электрический режим. Если используется метод интегрирования, не требующий информации с предыдущих шагов интегрирования, с автоматическим выбором шага, например, метод Рунге-Кутты четвертого или пятого порядка, уточнение мгновенного электрического режима происходит при автоматическом уменьшении шага интегрирования после возмущения режима вследствие коммутации в схеме.

Расчет мгновенного электрического режима методом эквивалентных преобразований проводится в именованных единицах в общих d_v , q_v осях и требует представления генератора источником тока, § 2.3. Поэтому источник ЭДС (5.82), (5.83) преобразуется в источник тока в собственных осях по формуле (1.4). Преобразование источника тока к общим осям выполняется по формулам (4.6) с использованием угла (5.52), и одновременно параметры источника тока пересчитываются в именованные единицы умножением задающего тока источника на номинальный ток и делением проводимости на номинальное сопротивление генератора.

§ 5.5. Расчёт параметров модели генератора

Информация о генераторе, необходимая для моделирования генераторов по уравнениям Парка-Горева, сведена в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Параметр	Обозначение
Тип генератора, число пар полюсов	p
Номинальная активная мощность, МВт	P_H
Номинальное напряжение, кВ	U_H
Номинальная полная мощность, МВ·А, и/или номинальный коэффициент мощности	S_H $\cos \varphi_H$
Активное сопротивление обмотки статора при температуре 75°C, н.о.е.	r
Индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора, н.о.е.	x_s
Синхронные индуктивные сопротивления по продольной и поперечной осям, н.о.е.	x_d, x_q
Переходное сопротивление по продольной оси, н.о.е.	x'_d
Сверхпереходные сопротивления по продольной и поперечной осям, н.о.е.	x''_d, x''_q
Реактивность обратной последовательности, н.о.е.	x_2
Постоянная времени обмотки возбуждения при прочих разомкнутых контурах, с	$T_r, (T_{d0})$
Сверхпереходная постоянная времени в продольной оси, с	T''_d
Сверхпереходная постоянная времени в поперечной оси, с	T''_q
Постоянная времени затухания аperiodической составляющей тока трехфазного короткого замыкания, с	T_a
Характеристика холостого хода	$U = f(i_r)$
Параметры многоконтурной схемы замещения ротора по осям d и q , н.о.е.	r_{rdi}, x_{rdi} r_{rqk}, x_{rqk}
Момент инерции вращающихся масс генератора и первичного двигателя, кг·м ²	$J_\Gamma + J_T$

Активные и индуктивные сопротивления выражаются в относительных единицах при номинальных условиях (н.о.е). Параметры оп-

ределены для идеализированной машины без учета насыщения стали. Часть каталожных параметров непосредственно фигурируют в уравнениях, остальные параметры модели определяются по каталожным данным с учетом допущений, § 4.3, положенных в основу уравнений Парка-Горва.

Реактивности взаимной индукции по осям d и q

$$x_{ad} = x_d - x_s, \quad x_{aq} = x_q - x_s.$$

Активное и индуктивные сопротивления контура возбуждения можно определить по формулам

$$x_r = \frac{x_{ad}^2}{x_d - x'_d}, \quad r_r = \frac{x_r}{\omega_s T_r},$$

$$x_{sr} = x_r - x_{ad} = x_{ad} \left(\frac{x_{ad}}{x_d - x'_d} - 1 \right).$$

При замещении демпферной системы генератора двумя эквивалентными контурами с постоянными параметрами сопротивления рассеяния демпферных контуров в осях d и q ненасыщенной машины определяются на основе схем замещения на рис. 5.2, где нужно положить $\vartheta_d = \vartheta_q = 1,0$ и оставить по одному демпферному контуру в каждой оси,

$$x_{srd1} = \frac{1}{\frac{1}{x_d'' - x_s} - \frac{1}{x_{ad}} - \frac{1}{x_{sr}}}, \quad x_{srq1} = \frac{1}{\frac{1}{x_q'' - x_s} - \frac{1}{x_{aq}}},$$

тогда индуктивные сопротивления демпферных контуров равны

$$x_{rd1} = x_{ad} + x_{srd1}, \quad x_{rq1} = x_{aq} + x_{srq1}.$$

Активные сопротивления эквивалентных демпферных контуров оцениваются на основе переходных и сверхпереходных параметров машины по формулам

$$r_{rd1} = \frac{(x_{rd1}x_d - x_{ad}^2)x_d''}{\omega_s x_d x'_d T_d''}, \quad r_{rq1} = \frac{x_{rq1}x_q - x_{aq}^2}{\omega_s x_q T_q''}.$$

Формула для расчета r_{rd1} применима, если выполняется соотношение $r_{rd1} \gg r_r$ [33], что справедливо для мощных явнополюсных синхронных машин и может рассматриваться как допущение для неявнополюсных синхронных машин в случае приближённого замещения массива ротора двумя эквивалентными демпферными контурами.

Постоянные времени эквивалентных демпферных контуров при прочих разомкнутых контурах по соответствующей оси равны

$$T_{rd1} = \frac{x_{rd1}}{\omega_s r_{rd1}}, \quad T_{rq1} = \frac{x_{rq1}}{\omega_s r_{rq1}}.$$

При использовании для турбогенераторов многоконтурной схемы замещения ротора параметры контуров должны быть уже синтезированы, постоянные времени контуров определяются по формулам, аналогичным T_{rd1} и T_{rq1} .

Характеристика насыщения стали генератора определяется по формулам (5.63), (5.64) на основе характеристики холостого хода.

Инерционная постоянная генерирующего агрегата

$$T_J = \frac{(J_r + J_t) \Omega_{cx}^2}{S_H},$$

где $\Omega_{cx} = \frac{2\pi n_{cx}}{60p} = \frac{100\pi}{p}$ – синхронная угловая скорость ротора, рад./с,

$n_{cx} = 3000$ об/мин – синхронная частота вращения двухполюсной машины при частоте 50 Гц.

Имеются полезные соотношения, которые позволяют, зная одни параметры, найти недостающие. Активное сопротивление статора можно найти по формуле

$$r \approx \frac{x_2}{\omega_s T_a}.$$

Реактивность обратной последовательности равна

$$x_2 \approx \frac{2x_d''x_q''}{x_d'' + x_q''},$$

откуда можно выразить, например, недостающее значение x_q'' .

§ 5.6. Расчёт начальных условий

Общие вращающиеся d_v, q_v оси совмещаются с осями комплексной плоскости. После расчёта исходного установившегося режима известны ток генератора \dot{I}_v и напряжение \dot{U}_v в узле включения генератора, определено положение векторов напряжения узла и тока генератора на комплексной плоскости. Заданное скольжение s_v общих d_v, q_v осей относительно синхронных d_s, q_s осей определяет частоту в энергосистеме $f = 1 + s_v$ в относительных единицах, при которой сбалансирован исходный режим.

Начальное значение скольжения ротора генератора относительно синхронных осей в уравнении (5.51) $s = s_v$. Определение начальных значений остальных интегрируемых переменных основано на построении векторной диаграммы генератора, рис. 5.3.

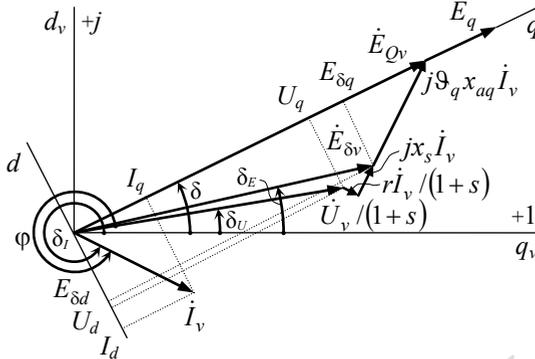


Рис. 5.3. Векторная диаграмма насыщенного генератора

Алгоритм расчета начальных значений интегрируемых переменных состоит из следующих шагов.

1. Если насыщение по пути основного магнитного потока в осях d и q генератора не учитывается, положить $\vartheta_d = \vartheta_q = 1,0$. При учёте насыщения в осях d и q , определить ЭДС за реактивностью рассеяния статора в общих осях по формулам (5.82), (5.83), ее модуль

$$E_{\delta v} = \sqrt{E_{\delta d v}^2 + E_{\delta q v}^2}$$

и вычислить параметр насыщения $\vartheta_d = \vartheta_q = \vartheta$ по характеристике насыщения (5.63), (5.64).

2. Определить ЭДС за насыщенным поперечным сопротивлением генератора в общих осях

$$\dot{E}_{Qv} = \frac{\dot{U}_v + Z_q \dot{I}_v}{(1+s)},$$

$$Z_q = r + j(1+s)(x_s + \vartheta_q x_{aq}).$$

Вектор \dot{E}_{Qv} направлен по собственной оси q генератора, поэтому начальное значение угла $\delta = (q \wedge q_v)$ в уравнении (5.52), отсчитываемого от оси q_v , к оси q против часовой стрелки,

$$\delta = \arctg \frac{\text{Im}(\dot{E}_{Qv})}{\text{Re}(\dot{E}_{Qv})} = \arctg \left(\frac{E_{Qdv}}{E_{Qqv}} \right).$$

3. Преобразовать d_v, q_v составляющие напряжения и тока генератора к собственным d, q осям

$$U_d = U_{dv} \cos \delta - U_{qv} \sin \delta, \quad U_q = U_{dv} \sin \delta + U_{qv} \cos \delta,$$

$$I_d = I_{dv} \cos \delta - I_{qv} \sin \delta, \quad I_q = I_{dv} \sin \delta + I_{qv} \cos \delta,$$

где $U_{qv} = \operatorname{Re}(\dot{U}_v)$, $U_{dv} = \operatorname{Im}(\dot{U}_v)$, $I_{qv} = \operatorname{Re}(\dot{I}_v)$, $I_{dv} = \operatorname{Im}(\dot{I}_v)$,

или определить углы $\delta_U = \operatorname{arctg} \frac{U_{dv}}{U_{qv}}$ и $\delta_I = \operatorname{arctg} \frac{I_{dv}}{I_{qv}}$ и спроецировать

концы векторов напряжения \dot{U}_v и тока \dot{I}_v на собственные оси машины:

$$U_d = U \sin(\delta - \delta_U), \quad U_q = U \cos(\delta - \delta_U)$$

$$I_d = I \sin(\delta - \delta_I), \quad I_q = I \cos(\delta - \delta_I).$$

4. Определить d, q составляющие ЭДС за реактивностью рассеяния статора в собственных d, q осях по формулам

$$E_{\delta q} = \frac{U_q + rI_q}{(1+s)} - x_s I_d,$$

$$E_{\delta d} = \frac{U_d + rI_d}{(1+s)} + x_s I_q$$

или определить угол $\delta_E = \operatorname{arctg} \frac{E_{\delta dv}}{E_{\delta qv}}$ и спроецировать конец вектора

$\dot{E}_{\delta v}$ на собственные оси

$$E_{\delta q} = E_{\delta} \cos(\delta - \delta_E),$$

$$E_{\delta d} = E_{\delta} \sin(\delta - \delta_E).$$

5. Если генератор явнополюсный и насыщение стали учитывается только в продольной оси, пересчитать параметр насыщения $\mathfrak{D}_d = f(E_{\delta q})$, используя характеристику насыщения (5.63), (5.64).

6. Определить синхронную ЭДС генератора и начальное значение напряжения, приложенного к обмотке возбуждения,

$$E_q = \frac{E_{\delta q}}{\mathfrak{D}_d} - x_{ad} I_d,$$

$$E_r = E_q.$$

7. Определить начальные значения потокосцепления обмотки возбуждения по формуле (5.55) и потокосцеплений демпферных контуров по формулам

$$\Psi_{rdi} = \frac{x_{ad}}{x_{rdi}} E_{\delta q},$$

$$\Psi_{rpk} = -\frac{x_{aq}}{x_{rpk}} E_{\delta d}.$$

8. Вычислить момент генератора по формуле (5.60) и определить начальное значение момента первичного двигателя

$$M_T = M_e.$$

§ 5.7. Расчет производных интегрируемых переменных

В ходе расчета электромеханического переходного процесса на каждом шаге численного интегрирования системы дифференциальных уравнений необходимо определять производные интегрируемых переменных. Алгоритм расчета производных состоит из следующих шагов.

1. Все активные узловые элементы (генераторы, двигатели) необходимо представить источниками ЭДС.

Текущие параметры эквивалентного источника ЭДС, замещающего генератор, определить по формулам (5.72)÷(5.75), и преобразовать источник ЭДС в несимметричный источник тока в собственных осях

$$J_q = I_q + U_q g - U_d b_d,$$

$$J_d = I_d + U_q b_q + U_d g,$$

$$\text{где } J_q = E_{qe} g - E_{de} b_d, \quad J_d = E_{de} g + E_{qe} b_q,$$

$$g = \frac{r}{r^2 + x_{de} x_{qe}}, \quad b_d = -\frac{x_{de}}{r^2 + x_{de} x_{qe}}, \quad b_q = -\frac{x_{qe}}{r^2 + x_{de} x_{qe}}.$$

Если насыщение стали не учитывается, $\vartheta_d = \vartheta_q = 1,0$, параметры генератора постоянны, если насыщение стали учитывается, определяются параметры насыщения. Для явнополюсных машин положить $\vartheta_q = 1$, и определить $\vartheta_d = f(E_{\delta q})$, для неявнополюсных $\vartheta_d = \vartheta_q = f(E_{\delta})$. При использовании многошаговых методов интегрирования переменные параметры $\vartheta_d, \vartheta_q, x_{de}, x_{qe}$ вычисляются на первом подшаге интегрирования, на следующих подшагах параметры считаются постоянными.

Используя параметры эквивалентного источника ЭДС, представить синхронный генератор ЭДС за реактивностью рассеяния статора в собственных d, q осях по формулам (5.82)÷(5.85), затем источник

ЭДС преобразовать в источник тока, а источник тока преобразовать от собственных к общим осям по формулам (4.6) с одновременным пересчетом параметров в именованные единицы.

2. Методом эквивалентных преобразований определить напряжения в узлах схемы.

3. Напряжение в узле включения генератора преобразовать к собственным осям машины по формулам (4.7) и одновременно пересчитать его из именованных в относительные единицы при номинальных условиях.

4. Зная напряжение в собственных осях и параметры несимметричного источника тока, найти d, q составляющие тока генератора

$$I_d = J_d - U_q b_q - U_d g, \quad I_q = J_q - U_q g + U_d b_d.$$

5. Определить d, q составляющие ЭДС за реактивностью рассеяния статора

$$E_{\delta q} = \frac{U_q + I_q r}{(1+s)} - I_d x_s, \quad E_{\delta d} = \frac{U_d + I_d r}{(1+s)} + I_q x_s.$$

Запомнить E_{δ} или $E_{\delta q}$ для расчёта параметров синхронной машины, зависящих от насыщения, на следующем шаге интегрирования.

6. Зная потокосцепления роторных контуров и ЭДС за реактивностью рассеяния статора, вычислить ЭДС, индуцируемые в статоре магнитным полем токов роторных контуров,

$$E_q = \frac{x_r}{x_{sr}} \Psi_r - \frac{x_{ad}}{x_{sr}} E_{\delta q},$$
$$E_{rqi} = \frac{x_{rdi}}{x_{sr di}} \Psi_{rdi} - \frac{x_{ad}}{x_{sr di}} E_{\delta q},$$
$$E_{rdk} = -\frac{x_{r qk}}{x_{sr qk}} \Psi_{rdk} - \frac{x_{aq}}{x_{sr qk}} E_{\delta d}.$$

7. По формуле (5.60) вычислить электромагнитный момент генератора.

8. Обратиться к процедуре расчёта режима системы возбуждения генератора и получить напряжение возбуждения E_r . Обратиться к процедуре расчёта режима первичного двигателя и получить значение момента M_T .

9. По формулам (5.48)÷(5.52) вычислить производные потокосцеплений роторных контуров, скольжения и угла между общими и собственными осями.