

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА СИНХРОНИЗАЦИИ В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С ДИЗЕЛЬ - ИНЕРЦИОННЫМИ УСТАНОВКАМИ ГАРАНТИРОВАННОГО ПИТАНИЯ С СОВМЕЩЕННЫМИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ МАШИНАМИ

д.т.н., проф. Б.Т. Кононов, Ю.А. Кусакин, А.Н. Малыш

В статье приводятся уравнения, образующие математическую модель процесса синхронизации дизель - инерционных установок гарантированно-го питания с совмещенными электрическими машинами.

Наиболее сложным и ответственным режимом работы дизель - инерционных установок гарантированного питания является режим синхронизации, который осуществляется при пуске установки и при переводе одной из статорных обмоток совмещенной электрической машины из режима генератора в режим двигателя после восстановления напряжения на питающем вводе внешней сети. Особенностью этого режима для совмещенной электрической машины является то обстоятельство, что синхронизация должна проводиться одновременно как в цепях, работающих с частотой 50 Гц, так и в цепях, работающих с частотой 400 Гц. Процесс синхронизации проводится при выполнении специальных условий, так называемых условий синхронизации, по которым величины углов между синхронизируемыми напряжениями δ_i , разности угловых частот скольжения ω_{si} и неодинаковости амплитуд синхронизируемых напряжений ΔU_i ($i = 1, 2$) не превышают допустимых значений. Величины δ_i , ω_{si} , ΔU_i будем называть начальными параметрами синхронизации, имея в виду что их надо выбирать как для статорных цепей, работающих на низких частотах (число пар полюсов обмотки P_1), так и для статорных цепей, работающих на высоких частотах (число пар полюсов обмотки P_2). Неправильный выбор начальных параметров синхронизации может повлечь за собой серьезные повреждения в системе электроснабжения, вплоть до выхода из строя основного оборудования.

Вопросы исследования переходных процессов при синхронизации достаточно подробно освещены в литературе, например, [1]. Однако, полученные результаты из-за громоздкости практически не применяются в инженерной практике и непригодны для систем электроснабжения с установками гарантированного питания, главной особенностью которых, определяющим образом влияющей на характер протекания переходного процесса, является большой запас кинетической энергии. Применение совмещенных электрических машин накладывает дополнительные ограничения на характер протекания переходных процессов, а спе-

цифическое для систем гарантированного питания требование обеспечения заданного качества электрической энергии приводит к существенному усложнению решаемой научно-технической задачи. Фактически задача сводится к получению расчетных соотношений, характеризующих процесс синхронизации и устанавливающих зависимости между отклонениями напряжения δU , бросками тока δI и начальными параметрами синхронизации δ , ω_s , ΔU , параметрами генераторов, характером и величиной нагрузки r_H , x_H , т.е. соотношения вида:

$$\delta U = f \left(\delta, \omega_s, \Delta U, x_d, x_q, x_d', x_d'', x_q', T_j \right);$$

$$\delta I = f \left(\delta, \omega_s, \Delta U, x_d, x_q, x_d', x_d'', x_q', T_j, r_H, x_H \right).$$

При разработке математической модели исследуемого процесса в качестве исходных использованы уравнения равновесия напряжений, записанные в системе относительных единиц в координатных осях «d» и «q», вращающихся с синхронной скоростью. Совмещенная электрическая машина представляется состоящей как бы из двух «отдельных» электрических машин [2, 3]. При этом считается, что конструкция совмещенной электрической машины выполнена таким образом, что взаимно индуктивные (паразитные) связи между «отдельными» машинами отсутствуют, и что в машине имеются две статорные обмотки на разное число пар полюсов, две обмотки возбуждения и две успокоительные короткозамкнутые обмотки. Внешняя сеть, работающая с частотой 50 Гц, представляется в виде неявнополюсного генератора, мощность которого соизмерима с мощностью совмещенной электрической машины, имеющего одну статорную обмотку, одну обмотку возбуждения и две успокоительные обмотки. Автономная сеть, работающая с частотой 400 Гц, представляется электрической машиной, имеющей одну статорную обмотку, обмотку возбуждения и две успокоительные обмотки. С учетом сделанных замечаний уравнения равновесия напряжений для сети 50 Гц и сети 400 Гц представим следующим образом:

$$\tilde{U}_i = \tilde{r}_i \tilde{I}_i + \frac{d\tilde{\psi}_i}{dt} - \tilde{\omega}_i \tilde{\psi}_i, \quad (1)$$

где матрицы напряжений \tilde{U}_i , сопротивлений \tilde{r}_i , токов \tilde{I}_i , потокосцеплений $\tilde{\psi}_i$ и угловых частот вращения $\tilde{\omega}_i$ имеют соответственно вид:

$$\tilde{U}_i = \begin{pmatrix} -U_{di} \\ -U_{qi} \\ U_{fi} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \tilde{r}_i = \begin{pmatrix} r_{ci} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{ci} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{fi} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{ri} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{ri} \end{pmatrix}; \quad \tilde{I}_i = \begin{pmatrix} I_{di} \\ I_{qi} \\ I_{fi} \\ I_{rdi} \\ I_{rqi} \end{pmatrix}; \quad (2)$$

$$\check{\Psi}_i = \begin{pmatrix} \Psi_{di} \\ \Psi_{qi} \\ \Psi_{fi} \\ \Psi_{rdi} \\ \Psi_{rqi} \end{pmatrix}; \quad \check{\Theta}_i = \begin{pmatrix} 0 & \omega_i & 0 & 0 & 0 \\ -\omega_i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix},$$

где $U_{di}, U_{qi}, I_{di}, I_{qi}, \Psi_{di}, \Psi_{qi}$ - напряжения, токи и потокосцепления статорной обмотки в проекциях на оси d и q ;

$U_{fi}, I_{fi}, \Psi_{fi}$ - напряжение, ток и потокосцепление обмотки возбуждения;

$I_{rdi}, I_{rqi}, \Psi_{rdi}, \Psi_{rqi}$ - токи и потокосцепления успокоительных обмоток;

r_{ci}, r_{fi}, r_{ri} - активные сопротивления статорных и роторных обмоток.

Уравнения равновесия напряжения совмещенной электрической машины представлены в виде уравнения (1), однако матрицы напряжений \check{U}_M , сопротивлений \check{r}_M , токов I_M и потокосцеплений $\check{\Psi}_M$ отличаются от соответствующих матриц (2) и имеют следующий вид:

$$\check{U}_M = \begin{pmatrix} -U_{dM1} \\ -U_{qM1} \\ -U_{dM2} \\ -U_{qM2} \\ U_{fM1} \\ U_{fM2} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}; \quad \check{r}_M = \begin{pmatrix} r_{M1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_{M1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & r_{M2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & r_{M2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fM1} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{fM2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{rM} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & r_{rM} \end{pmatrix};$$

$$\check{I}_M = \begin{pmatrix} I_{dM1} \\ I_{qM1} \\ I_{dM2} \\ I_{qM2} \\ I_{fM1} \\ I_{fM2} \\ I_{rdM} \\ I_{rqM} \end{pmatrix}; \quad \check{\Psi}_M = \begin{pmatrix} \Psi_{dM1} \\ \Psi_{qM1} \\ \Psi_{dM2} \\ \Psi_{qM2} \\ \Psi_{fM1} \\ \Psi_{fM2} \\ \Psi_{rdM} \\ \Psi_{rqM} \end{pmatrix}. \quad (3)$$

Дополним (1) уравнением, отражающим связь между потокосцеплениями и токами

$$\tilde{\Psi}_i = \tilde{x}_i \tilde{I}_i, \quad (4)$$

где \tilde{x} - матрица реактивных сопротивлений статорных и роторных контуров.

Для сети частотой 50 Гц и сети частотой 400 Гц матрицы \tilde{x}_i имеют вид

$$\tilde{x}_i = \begin{pmatrix} x_{di} & 0 & x_{adi} & x_{adi} & 0 \\ 0 & x_{qi} & 0 & 0 & x_{aqi} \\ x_{adi} & 0 & x_{fi} & x_{adi} & 0 \\ x_{adi} & 0 & x_{adi} & x_{rdi} & 0 \\ 0 & x_{aqi} & 0 & 0 & x_{rqi} \end{pmatrix}, \quad (5)$$

$i = 1, 2$.

Для совмещенной электрической машины, у которой отсутствуют «паразитные» взаимноиндуктивные связи матрица \tilde{x}_M может быть представлена в следующем виде:

$$\tilde{x}_M = \begin{pmatrix} x_{dM1} & 0 & 0 & 0 & x_{adM} & 0 & x_{adM} & 0 \\ 0 & x_{qM1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & x_{aqM} \\ 0 & 0 & x_{dM2} & 0 & 0 & x_{adM} & x_{adM} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & x_{qM2} & 0 & 0 & 0 & x_{aqM} \\ x_{adM} & 0 & 0 & 0 & x_{fM1} & x_{adM} & x_{adM} & 0 \\ 0 & 0 & x_{adM} & 0 & x_{adM} & x_{fM2} & x_{adM} & 0 \\ x_{adM} & 0 & x_{adM} & 0 & x_{adM} & x_{adM} & x_{rdM} & 0 \\ 0 & x_{aqM} & 0 & x_{aqm} & 0 & 0 & 0 & x_{rqM} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Совместную работу сети 50 Гц, сети 400 Гц и электрической машины отразим уравнениями связи

$$\begin{aligned} I_{d1} + I_{dM1} - I_{dH1} &= 0; \\ I_{q1} + I_{qM11} - I_{qH1} &= 0; \\ U_{d1} &= U_{dM11} = U_{d1}; \\ U_{q1} &= U_{qM11} = U_{q1}; \\ I_{d2} + I_{dM22} - I_{dH2} &= 0; \\ I_{q2} + I_{qM22} - I_{qH2} &= 0; \\ U_{d2} &= U_{dM22} = U_{d2}; \\ U_{q2} &= U_{qM22} = U_{q2}, \end{aligned} \quad (7)$$

где $I_{d1}, I_{q1}, I_{d2}, I_{q2}, U_{d1}, U_{q1}, U_{d2}, U_{q2}$ - проекции токов и напряжений работающих машин (сети 50 Гц и сети 400 Гц) на координатные оси d и q ;

$I_{dM11}, I_{qm11}, U_{dM11}, U_{qM22}$ - проекции токов и напряжений первой статорной обмотки (обмотки 50 Гц) включаемого генератора на координатные оси генератора, работающего в сети 50 Гц;

$I_{dM22}, I_{qM22}, I_{dM22}, U_{qM22}$ - проекции токов и напряжений второй статорной обмотки (обмотки 400 Гц) включаемого генератора на координатные оси генератора, работающего в сети 400 Гц;

$I_{dHi}, I_{qHi}, U_{di}, U_{qi}$ - проекции тока нагрузки и напряжения на нагрузке на координатные оси, причем:

$$\begin{aligned} I_{dHi} &= U_{di} q_{Hi} - U_{qi} b_{Hi}; \\ I_{qHi} &= U_{di} b_{Hi} - U_{qi} q_{Hi}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $q_{Hi} = \frac{r_{Hi}}{r_{Hi}^2 + x_{Hi}^2}$; $b_{Hi} = \frac{x_{Hi}}{r_{Hi}^2 + x_{Hi}^2}$ - проводимости нагрузки;

r_{Hi}, x_{Hi} - активные и реактивные сопротивления нагрузки.

Для записи уравнений равновесия напряжений включаемого генератора в координатных осях работающего генератора воспользуемся формулами прямого и обратного перехода:

$$\check{\Pi}(j)_{11(22)} = \check{C}\Pi(j)_{1(2)}; \quad \check{\Pi}(j)_{1(2)} = \check{C}_t\Pi(j)_{11(22)},$$

где $j = 1, 2, 3$; $\check{\Pi}(1) = \check{U}$; $\check{\Pi}(2) = \check{I}$; $\check{\Pi}(3) = \check{\psi}$,

$$\check{C} = \begin{pmatrix} \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}; \quad (9)$$

\check{C}_t - транспонированная матрица матрицы \check{C} .

Текущее значение угла δ_i между координатными осями равно

$$\delta_i = \int_0^t \omega_{si} dt + \delta_{0i}, \quad (10)$$

где ω_{si} - угловая скорость скольжения; δ_{0i} - начальный угол между роторами.

Используя правила перехода (9), преобразуем уравнение (1) к виду

$$\ddot{\mathbf{U}}_{iM} = \ddot{\mathbf{C}}_r \ddot{\mathbf{f}}_i \ddot{\Psi}_{iM} + \ddot{\mathbf{C}}_t \frac{d\ddot{\Psi}_{iM}}{dt} + \ddot{\mathbf{C}} \frac{d\ddot{\mathbf{C}}_t}{dt} \ddot{\Psi}_{iM} - \ddot{\mathbf{C}} \ddot{\omega}_M \ddot{\mathbf{C}}_t \ddot{\mathbf{U}}_{iM}. \quad (11)$$

Соотношение (11) позволяет связать координатные оси сети 50 Гц и сети 400 Гц с координатными осями совмещенной электрической машины. Особенностью записи (11) является введение матрицы проводимостей, равной матрице $\ddot{\mathbf{X}}^{-1}$, позволяющей уменьшить число переменных и выразить токи через потокоцепления.

Уравнения (1), (3) – (8), (11) образуют уравнения математической модели процесса синхронизации дизель-инерционной установки гарантированного питания с совмещенной электрической машиной. Для учета изменения скольжения ω_{si} эти уравнения необходимо дополнить уравнениями относительного движения роторов электрических машин

$$\frac{d^2 \delta_i}{dt^2} = \frac{\mathbf{M}_{qi} - (\Psi_{qMi} I_{dMi} - \Psi_{dMi} I_{qMi})}{T_{ji}}, \quad (12)$$

где \mathbf{M}_{qi} - движущие моменты приводных двигателей;

T_{ji} - инерционные постоянные.

Предложенная математическая модель позволяет исследовать электромагнитные и электромеханические переходные процессы и найти как условия обеспечения устойчивости процесса синхронизации, так и условия обеспечения требуемых показателей качества электрической энергии в этом процессе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Константинов В.Н. Синхронизация судовых синхронных генераторов – Л.: Судостроение, 1978. – 197 с.
2. Загрядский В.И. Совмещенные электрические машины. – Кишинев: Карта Молдовеняскэ, 1971. – 164 с.
3. Луцки В.Д. Совмещенные электрические машины и аппараты – К.: Техника, 1993. – 203 с.

Поступила 10.12.2001

КОНОНОВ Борис Тимофеевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры ХВУ. В 1962 году окончил Львовский политехнический институт. Область научных интересов – источники гарантированного питания.

КУСАКИН Юрий Александрович, начальник факультета ХВУ. В 1986 году окончил Харьковское ВВКИУ. Область научных интересов – источники гарантированного питания.

МАЛЫШ Александр Николаевич, адъюнкт ХВУ. В 1987 году окончил Рижское ВВПКУ. Область научных интересов – источники гарантированного питания.