

ФОРМИРОВАНИЕ ВЕКТОРА НАПРЯЖЕНИЯ НА ШИНАХ АВТОНОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Ю.Н. Хижняков

Пермский государственный технический университет

E-mail: uz@pstu.ac.ru

Рассмотрены вопросы формирования вектора напряжения на шинах параллельной работы синхронных генераторов автономной электростанции и расчет тока нагрузки каждого генератора, что позволяет строить математические модели автономных электростанций и исследовать их от режима холостого хода до режима короткого замыкания. Синхронный генератор в системе представлен как источник электродвижущей силы с внутренним сопротивлением через уравнения Парка–Горева в модификации Л.П. Веретенникова.

Ключевые слова:

Математические модели, дифференциальные уравнения Парка–Горева, синхронный генератор, пассивная и асинхронная нагрузка, системы координат, шины, вектор напряжения, внутренняя ЭДС.

Key words:

Mathematical models, Park–Gorev differential equation, synchronous generator, passive and asynchronous load, coordinate systems, buses, stress vector, internal emf.

Существует актуальная задача формирования напряжения на шинах автономной электростанции (АЭС), которая имеет ряд приближенных решений. К ним относятся:

- определение напряжения на шинах АЭС через падение напряжения на активном сопротивлении нагрузки [1];
- согласование входов, обусловленное пренебрежением электромагнитными переходными процессами в одном элементе АЭС [2];
- определение напряжения на шинах АЭС методом активного сопротивления с одновременной компенсацией его при помощи фиктивного источника тока [3];
- определение напряжения на шинах АЭС методом неполного дифференцирования [4].

Анализ данных методов о возможности их применения для параллельной работы n синхронных генераторов (СГ) показал отсутствие желаемой универсальности:

- возникают трудности в определении уравнительных токов СГ;
- не обеспечивается анализ распределения тока нагрузки между СГ.

Для решения рассмотрим способ определения напряжения на шинах АЭС методом двух узлов [5].

Под методом двух узлов понимается метод расчета электрических цепей, в которых за искомое принимают напряжение между двумя узлами схемы с последующим определением токов в ветвях цепи.

В любой АЭС можно выделить n генераторных ветвей, эквивалентную пассивную и эквивалентную асинхронную нагрузки.

Генераторная ветвь приведена на рисунке и представлена источником внутренней электродвижущей силы (ЭДС) E_i с внутренним сопротивлением $Z = r_s + jX_{\sigma s}$, где E_i рассчитывается с помощью уравнения Парка–Горева в модификации Л.П. Веретенникова.

Эквивалентная пассивная нагрузка $\bar{I}_n$ характеризует статическую активную или активно-индуктивную нагрузку.

Эквивалентная асинхронная нагрузка $\bar{I}_s$ характеризуется асинхронным двигателем, который представлен уравнением Парка–Горева [1] и включен на шины с напряжением U .

Для моделирования параллельной работы СГ требуется единая система координат, в которой были бы записаны дифференциальные уравнения генераторов и нагрузки на шинах. Скорость вращения единой системы координат ω_k может быть любой. Если $\omega_k = 0$, то система координат статора $\alpha, \beta, 0$, если $\omega_k = \omega_p$, то система координат ротора $d, q, 0$, если $\omega_k = \omega_0$, то синхронно вращающаяся система координат $x, y, 0$, если $\omega_k = \text{var}$, то система $u, v, 0$ [6].

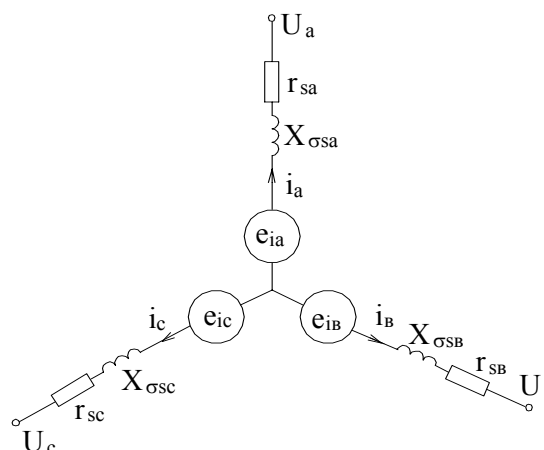


Рисунок. Схема генераторной ветви: где r_{sa}, r_{sb}, r_{sc} – активные сопротивления фаз статора генераторной ветви; $X_{\sigma sa}, X_{\sigma sb}, X_{\sigma sc}$ – индуктивные сопротивления фаз статора генераторной ветви; i_a, i_b, i_c – токи фаз статора генераторной ветви; e_a, e_b, e_c – мгновенные значения внутренней ЭДС фаз статора генераторной ветви; U_a, U_b, U_c – мгновенные значения напряжения фаз статора генераторной ветви

Выбор системы координат ротора какого-то одного СГ в качестве единой системы координат для связи с системами координат ротора других СГ требует уравнений преобразований:

$$\left. \begin{aligned} A_{d\xi} &= \sum_{k=1, k \neq \xi}^{n-1} A_{dk} \cos \Delta\delta_k + \sum_{k=1, k \neq \xi}^{n-1} A_{qk} \sin \Delta\delta_k; \\ A_{q\xi} &= \sum_{k=1, k \neq \xi}^{n-1} A_{qk} \cos \Delta\delta_k - \sum_{k=1, k \neq \xi}^{n-1} A_{dk} \sin \Delta\delta_k; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} A_{dk} &= A_{d\xi} \cos \Delta\delta_k - A_{q\xi} \sin \Delta\delta_k; \\ A_{qk} &= A_{q\xi} \cos \Delta\delta_k + A_{d\xi} \sin \Delta\delta_k; \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $\Delta\delta_k = \int_0^t (\omega_\xi - \omega_k) dt$ — угол выбора ротора k -СГ;

$A_{d\xi}, A_{q\xi}$ — результирующие проекции векторов переменных ведомого СГ по осям d и q в системе координат ведущего СГ; A_{dk}, A_{qk} — проекции вектора переменных по осям d и q ведомого СГ в собственной системе координат.

При моделировании параллельной работы СГ в системе координат статора $\alpha, \beta, 0$ или синхронно вращающейся системе координат $x, y, 0$ преобразований (1), (2) не требуется, что является определяющим. Поэтому выбирать систему координат ротора для моделирования параллельной работы СГ нецелесообразно.

На основании теории векторного анализа симметричных систем запишем уравнение статора СГ через внутреннюю ЭДС E_i :

- в системе координат статора

$$\bar{U} = \bar{E}_i - r_s \bar{I} - X_{\sigma s} \frac{d\bar{I}}{d\omega_0 t}, \quad (3)$$

здесь $\bar{U}, \bar{E}_i, \bar{I}$ — соответственно, мгновенное значение вектора напряжения на шинах АЭС, внутренней ЭДС в зазоре СГ и тока статора СГ;

- в синхронно вращающейся системе координат

$$\bar{U} = \bar{E}_i - (r_s + jX_{ys})\bar{I} - X_{ys} \frac{d\bar{I}}{du_0 t}. \quad (4)$$

Примем

$$\left. \begin{aligned} r_{s1} &\neq r_{s2} \neq \dots \neq r_{sn}; \\ X_{\sigma s1} &\neq X_{\sigma s2} \neq \dots \neq X_{\sigma sn}; \\ \bar{E}_{i1} &\neq \bar{E}_{i2} \neq \dots \neq \bar{E}_{in}. \end{aligned} \right\}$$

Тогда ток в генераторной ветви k -СГ, согласно формул (3), (4), запишется следующим образом:

$$\bar{I}_k = (\bar{E}_{ik} - \bar{U})(r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p)^{-1} \Big|_{\omega_k=0}; \quad (5)$$

$$\bar{I}_k = (\bar{E}_{ik} - \bar{U})(Z_k + X_{\sigma Sk} p)^{-1} \Big|_{\omega_k=\omega_0}, \quad (6)$$

где $Z_k = r_{Sk} + jX_{\sigma Sk}$.

Суммарный ток в обмотках статора генераторов, согласно (5) и (6), равен:

$$\sum_{k=1}^n \bar{I}_k = \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} - \bar{U} \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} \Big|_{\omega_k=0}, \quad (7)$$

$$\sum_{k=1}^n \bar{I}_k = \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} - \bar{U} \sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} \Big|_{\omega_k=0}. \quad (8)$$

Запишем, используя (7) и (8), получим уравнение баланса токов в АЭС

$$\sum_{k=1}^n \bar{I}_k = \bar{I}_n + \bar{I}_s. \quad (9)$$

Подставляя (10) в (8) и (9) получим напряжения на шинах АЭС:

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \left(\sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} - \bar{I}_n - \bar{I}_s \right) \times \\ &\times \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} \right)^{-1} \Big|_{\omega_k=0}, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \bar{U} &= \left(\sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} - \bar{I}_n - \bar{I}_s \right) \times \\ &\times \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} \right)^{-1} \Big|_{\omega_k=\omega_0}. \end{aligned} \quad (11)$$

Для определения тока ξ -СГ запишем тождества (12) и (13).

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} &= \bar{E}_{i\xi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} - \\ &- \sum_{k=1}^n (\bar{E}_{i\xi} - \bar{E}_{ik}) \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} \Big|_{\omega_k=0}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} &= \bar{E}_{i\xi} \sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} - \\ &- \sum_{k=1}^n (\bar{E}_{i\xi} - \bar{E}_{ik}) \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} \Big|_{\omega_k=\omega_0}. \end{aligned} \quad (13)$$

Заменим в (5) и (6) индекс на ξ , подставим в них, соответственно, (10) и (11) и, используя тождества (12) и (13), получим ток ξ -СГ:

$$\begin{aligned} \bar{I}_\xi &= (r_{S\xi} + X_{\sigma S\xi} p)^{-1} \times \\ &\times \left[\sum_{k=1}^n (\bar{E}_{i\xi} - \bar{E}_{ik}) \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} + \bar{I}_n + \bar{I}_s \right] \times \\ &\times \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{r_{Sk} + X_{\sigma Sk} p} \right)^{-1} \Big|_{\omega_k=0}, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_\xi &= (Z_\xi + X_{\sigma S\xi} p)^{-1} \times \\ &\times \left[\sum_{k=1}^n (\bar{E}_{i\xi} - \bar{E}_{ik}) \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} + \bar{I}_n + \bar{I}_s \right] \times \\ &\times \left(\sum_{k=1}^n \frac{1}{Z_k + X_{\sigma Sk} p} \right)^{-1} \Big|_{\omega_k=\omega_0}. \end{aligned} \quad (15)$$

В случае, когда

$$\begin{aligned} r_{S1} &\neq r_{S2} \neq \dots \neq r_{Sn}; \\ X_{\sigma S1} &\neq X_{\sigma S2} \neq \dots \neq X_{\sigma Sn}; \\ \bar{E}_{i1} &\neq \bar{E}_{i2} \neq \dots \neq \bar{E}_{in}, \end{aligned}$$

то, согласно формул (10), (11), (14), (15), можно записать в виде:

$$\bar{U} = n^{-1} \left[\sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} - (r_S + X_{\sigma S} p)(\bar{I}_n + \bar{I}_S) \right] \Big|_{\omega_k = \omega_0}, \quad (16)$$

$$\bar{U} = n^{-1} \left[\sum_{k=1}^n \bar{E}_{ik} - (Z + X_{\sigma S} p)(\bar{I}_n + \bar{I}_S) \right] \Big|_{\omega_k = \omega_0}, \quad (17)$$

$$\bar{I}_\xi = n^{-1} [(r_S + X_{\sigma S} p)^{-1} \sum_{k=1}^n (\bar{E}_{\xi} - \bar{E}_{ik}) + \bar{I}_n + \bar{I}_S] \Big|_{\omega_k = \omega_0}, \quad (18)$$

$$\bar{I}_\xi = n^{-1} [(Z + X_{\sigma S} p)^{-1} \sum_{k=1}^n (\bar{E}_{\xi} - \bar{E}_{ik}) + \bar{I}_n + \bar{I}_S] \Big|_{\omega_k = \omega_0}. \quad (19)$$

Если принимать во внимание, что векторы переменных СГ лежат в первом квадранте системы координат $\alpha, \beta, 0$, то

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= u_\alpha + ju_\beta \\ \bar{I} &= i_\alpha + ji_\beta \\ \bar{E}_i &= e_{i\alpha} + je_{i\beta} \end{aligned} \right\}$$

и учесть, что эквивалентная (суммарная) нагрузка пассивной ветви:

$$\bar{I}_n = i_{n\alpha} + ji_{n\beta}$$

и эквивалентная нагрузка асинхронной ветви:

$$\bar{I}_S = i_{S\alpha} + ji_{S\beta},$$

то из (16) и (17) можно записать проекции векторов напряжения на шинах АЭС на оси α и β :

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha &= n^{-1} \left[\sum_{k=1}^n e_{\alpha k} - (r_S + X_{\sigma S} p)(i_{n\alpha} + i_{S\alpha}) \right]; \\ u_\beta &= n^{-1} \left[\sum_{k=1}^n e_{\beta k} - (r_S + X_{\sigma S} p)(i_{n\beta} + i_{S\beta}) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

а из (19) записать проекции тока ξ -СГ на оси α и β :

$$\left. \begin{aligned} i_{\alpha\xi} &= n^{-1} [(r_S + X_{\sigma S} p)^{-1} \sum_{k=1}^n (e_{i\alpha\xi} - e_{i\alpha k}) + i_{n\alpha} + i_{S\alpha}]; \\ i_{\beta\xi} &= n^{-1} [(r_S + X_{\sigma S} p)^{-1} \sum_{k=1}^n (e_{i\beta\xi} - e_{i\beta k}) + i_{n\beta} + i_{S\beta}]. \end{aligned} \right\}$$

Если аналогично принять, что векторы переменных СГ в генераторном режиме лежат в первом квадранте осей x и y :

$$\left. \begin{aligned} \bar{U} &= u_X + ju_Y; \\ \bar{I} &= i_X + ji_Y; \\ \bar{E}_i &= e_{iX} + je_{iY} \end{aligned} \right\}$$

и учесть, что эквивалентная нагрузка пассивной ветви на оси x и y :

$$\bar{I}_n = i_{nX} + ji_{nY}$$

и эквивалентная нагрузка асинхронной ветви на оси x и y :

$$\bar{I}_S = i_{SX} + ji_{SY},$$

то из (18) можно записать проекции вектора напряжения на оси x и y :

$$\left. \begin{aligned} u_X &= n^{-1} \left[\sum_{k=1}^n e_{iXk} + X_{\sigma S} (i_{nY} + i_{SY}) - \right. \\ &\quad \left. - (r_S + X_{\sigma S} p)(i_{nX} + i_{SX}) \right]; \\ u_Y &= n^{-1} \left[\sum_{k=1}^n e_{iYk} - X_{\sigma S} (i_{nX} + i_{SX}) - \right. \\ &\quad \left. - (r_S + X_{\sigma S} p)(i_{nY} + i_{SY}) \right]; \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

и из (20) проекции вектора токов ξ -СГ на оси x и y :

$$\left. \begin{aligned} i_{X\xi} &= (r_S + X_{\sigma S} p)^{-1} \left[\begin{aligned} &X_{\sigma S} i_{Y\xi} + n^{-1} \sum_{k=1; k \neq \xi}^n (e_{iX\xi} - e_{iXk}) - \\ &-\frac{X_{\sigma S}}{n} (i_{nY} + i_{SY}) \end{aligned} \right] + \\ &\quad + n^{-1} (i_{nX} + i_{SX}); \\ i_{Y\xi} &= (r_S + X_{\sigma S} p)^{-1} \left[\begin{aligned} &-X_{\sigma S} i_{X\xi} + n^{-1} \sum_{k=1; k \neq \xi}^n (e_{iY\xi} - e_{iYk}) + \\ &+\frac{X_{\sigma S}}{n} (i_{nX} + i_{SX}) \end{aligned} \right] + \\ &\quad + n^{-1} (i_{nY} + i_{SY}). \end{aligned} \right\}$$

Анализ выражений проекций вектора напряжения (20) и (21) показал, что в них входят производные проекций векторов тока эквивалентной пассивной и асинхронной нагрузок. Отсюда следует предусмотреть выделение необходимых проекций производных эквивалентной пассивной и асинхронной нагрузок.

Отметим, что связь между напряжением на шинах АЭС и источником внутренней ЭДС генераторных ветвей линейная. Это справедливо, так как токи генераторных ветвей находятся через падение напряжения на их линейных индуктивных сопротивлениях рассеяния $X_{\sigma S}$ и активных сопротивлениях сатора r_S . Данные сопротивления не зависят от насыщения стали СГ и его угла выбега.

Выводы

Показано, что формирование вектора напряжения на шинах автономной электростанции методом двух узлов в осях $\alpha, \beta, 0$ ($x, y, 0$) позволяет:

- выполнить расчет вектора напряжения в статике и динамике на шинах автономной электростанции;
- рассчитать распределение суммарного тока нагрузки между синхронными генераторами в зависимости от величины их мгновенных внутренних электродвижущих сил;
- выполнить расчет уравнивающих токов между синхронными генераторами;

- исследовать переходные процессы в каждом элементе автономной электростанции и системе в

целом, что отвечает требованию структурного моделирования сложных систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веретенников Л.П. Исследование процессов в судовых электроэнергетических системах. Теория и методы. – Л.: Судостроение, 1975. – 367 с.
2. Тужик С.К. К выявлению напряжения при исследовании группы электрических машин на математической модели // Известия вузов. Сер. Энергетика. – 1964. – № 12. – С. 1–6.
3. Климанов О.Н. Моделирование апериодических составляющих синхронного генератора автономной энергетической системы // Труды ЦНИИСЭТ. – 1974. – Вып. 9. – С. 21–29.
4. Хижняков Ю.Н. Комбинированный метод управления параллельной работой генераторов переменного тока. – Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 1999. – 114 с.
5. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Изд. 6-е, перераб. и доп. – М., Высшая школа, 1973. – 752 с.
6. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. Пер. с немец. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 744 с.

Поступила 06.03.2009 г.

УДК 621.311.004.13

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ РЕЖИМАМИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ УСТОЙЧИВОСТИ НУРЕКСКОЙ ГЭС ПУТЕМ ОТКЛЮЧЕНИЯ ГЕНЕРАТОРОВ

А.Г. Фишов, Л.С. Касобов*

Новосибирский государственный технический университет

E-mail: loiknstu@mail.ru

Предложен алгоритм управления для предотвращения нарушений устойчивости путем отключения генераторов ГЭС с определением числа отключаемых генераторов в ходе процесса и оценки запасов статической устойчивости в режиме реального времени. Используются данные синхронизированной регистрации процессов на шинах электростанций энергосистемы Таджикистана.

Ключевые слова:

Система мониторинга переходных режимов, статическая устойчивость, динамическая устойчивость, управляющие воздействия.

Key words:

Power system stability, power system steady-state stability, power system transient stability, emergency automation.

Основы управления переходными режимами ЭС

При возмущении в системе после анализа (классификации) аварийной ситуации возникает задача управления переходным процессом энергосистемы (ЭС) для перевода ее к устойчивому послеаварийному режиму. При этом необходимо учитывать технические ограничения, имеющиеся у каждого объекта и его элементов, а также ресурсы, управляющие воздействий (УВ).

Формулирование задачи управления режимом ЭС, исходя из общей теории управления, включает следующие этапы:

1. Постановка задачи:

- а) определяется цель (цели) управления режимом при возмущении;
- б) намечаются возможные виды управлений, ведущие к достижению поставленных целей.

2. Формализация задачи:

- а) математически формулируется цель управления, например: перевод системы из одного со-

стояния с координатами x_0 в другое с координатами x_1 или движение системы по заданной траектории $x(t)$;

- б) описываются существенные взаимосвязи между переменными.

Цель противоаварийного управления функционирующей энергосистемой в общем случае – повышение надежности энергоснабжения потребителей. Однако в каждом из возможных режимов работы системы цель эта может сужаться и принимать частные формы. Так, например, целью управления нормальными режимами может быть снижение потерь электроэнергии, расхода топлива, обеспечение заданного коэффициента запаса статической устойчивости. Цель управления переходными режимами – сохранение динамической устойчивости перехода от аварийного режима к выbranному послеаварийному. В каждом из этих режимов могут использоваться свои УВ: в первом случае – перераспределение нагрузок между станциями, изменение коэффициентов трансформации и др., во втором – отключение генераторов