XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. II: С. 3-6, 2002. © Санкт-Петербургский государственный технический университет, 2002.

УДК 621.316.925

А.В.Коротков (4 курс, каф. ЭСиС), Р.П.Кияткин, к.т.н., доц.

АЛГОРИТМ ПРОТИВОАВАРИЙНОГО УПРАВЛЕНИЯ МОЩНОСТЬЮ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Актуальность работы обусловлена необходимостью устранения возникающих в практике энергосистем ограничений по продаже электроэнергии электростанцией на рынке энергии, обусловленных возможностью нарушения её устойчивости в нормальных и аварийных режимах энергосистем [1]. Указанные ограничения возникают в нормальных режимах работы энергосистем при недостаточном уровне строительства ЛЭП в энергосистеме, а также при недостаточном уровне развития противоаварийной автоматики энергосистем.

Целью данной работы являлась разработка алгоритма противоаварийного управления мощностью турбин (ПАУМТ) электростанции для предотвращения нарушения устойчивости её параллельной работы в энергосистеме.

Физический смысл задачи обеспечения устойчивости параллельной работы электростанции в энергосистеме заключается в специфике параллельной работы синхронных электрических машин (генераторов) электростанции и энергосистемы. Об устойчивости параллельной работы электростанции при её исследовании на ЭВМ судят по характеру изменения во времени взаимного угла δ вектора э.д.с. генераторов электростанции по отношению к вектору напряжения энергосистемы (в узле подключения электростанции к энергосистеме). Устойчивость энергосистемы обеспечивается, если взаимные углы (сдвиги фаз напряжений) всех входящих в неё электростанций ограничены и находятся в ограниченной части фазового пространства энергосистемы.

Теоретически оценка изменения угла δ во времени требует решения нелинейных дифференциальных уравнений, описывающих электромеханические переходные процессы генераторов электростанции при изменениях режима её работы (при изменении электрической нагрузки потребителей в энергосистеме, при аварийных отключениях частей ЛЭП, связывающей электростанцию с энергосистемой, при к.з. на них, при непредвиденном изменении мощности турбин электростанции в процессе эксплуатации). Нелинейный характер дифференциальных уравнений электромеханических переходных процессов в энергосистеме не позволяет получить в аналитической форме изменение угла δ как функции времени. В практике энергосистем указанные уравнения решаются численно. Недостатком этого является то, что определяются лишь частные решения, соответствующие конкретным условиям. При этом отсутствует возможность анализа общих свойств устойчивости энергосистем с целью выбора алгоритмов системы противоаварийной автоматики энергосистем, в том числе и алгоритмов противоаварийного управления мощностью электростанций.

Поэтому внимание исследователей привлекают достоинства одного из основных методов аналитического исследования нелинейных дифференциальных уравнений: метода функций Ляпунова [2]. Функция Ляпунова в математическом аспекте в ряде случаев представляет собой первый интеграл уравнений энергосистемы [3], т.е. такую функцию переменных, значение которой остается постоянной для частного решения системы уравнений, описывающих переходные процессы (движение) в исследуемой энергосистеме. В пространстве переменных энергосистемы (углов δ и скольжений $S=d\delta/dt$) линии равного уровня, описываемые первым интегралом, позволяют ответить на вопрос об устойчивости энергосистемы без численного интегрирования уравнений движения.

Одним из видов записи функций Ляпунова для энергосистем является полная энергия электромеханического переходного процесса в энергосистеме V, равная сумме его кинетической (К) и потенциальной (П) энергий: V=К+П.

Рассмотрим уравнения электромеханического переходного процесса в энергосистеме в простейшей (консервативной) идеализации для энергосистемы типа «машина – шины бесконечной мощности» [4]:

$$d\delta/dt=S, \qquad T_j dS/dt=P_{\text{Т}}-P_{\text{ЭЛ}}, \tag{1}$$

где S — скольжение (отклонение скорости вращения турбины); T_j — эквивалентная постоянная инерции генератора электростанции (учитывающая момент инерции турбины и энергоносителя: воды или пара); $P_{\text{Т}}=P_{\text{Т}}^0+\Delta P_{\text{Т}}$ — текущее значение мощности турбины; $P_{\text{Т}}^0$ — исходное значение мощности турбины; $\Delta P_{\text{Т}}$ — изменение мощности турбины в процессе её противоаварийного управления; $P_{\text{ЭЛ}}=(EU/X)\times\sin\delta$ — электромагнитная (активная) мощность генератора; E — модуль вектора э.д.с. генератора; U — модуль вектора напряжения энергосистемы (шин неизменного напряжения); X — реактанс связи электростанции с энергосистемой; δ — взаимный угол (сдвиг фаз) между векторами **E** и **U**.

Функцию Ляпунова для системы (1) запишем в виде полной энергии электромеханического переходного процесса [3]:

$$V=\text{К}+\Pi_\delta=\frac{T_j S^2}{2}+\left\{-\int\limits_{\delta^0}^{\delta}\left[P_{\text{Т}}^0-\frac{EU}{X}\sin\delta\right]d\delta\right\}, \tag{2}$$

где К — кинетическая энергия; Π_δ — потенциальная энергия системы, соответствующая значению угла δ.

Физически потенциальной энергии соответствует работа, совершаемая небалансом сил на валу машины (момента турбины и электромагнитного момента) по перемещению системы из состояния (δ^0, 0) в состояние (δ, 0). Эта работа может быть совершена, например, во время к.з. в системе, при изменении мощности турбины и т.п. Если в результате совершаемой работы для послеаварийного или иного исследуемого режима величина полной энергии не превышает значения, соответствующего замкнутой поверхности уровня первого интеграла $V(\delta, S)<V_{\text{ГР}}$, то дальнейшее движение системы будет устойчиво (ограничено).

Это обстоятельство используется в предлагаемом алгоритме ПАУМТ. Особенностью алгоритма является использование двух факторов: стабилизации (демпфирования) переходного процесса и обеспечения заданных запасов устойчивости устанавливающихся режимов энергосистемы в реальном масштабе времени. При этом рассматривается два его аспекта. В процессе управления алгоритм ПАУМТ обеспечивает стабилизацию переходного процесса в энергосистеме к установившемуся режиму со значением угла $\delta=\delta^0$. При этом используется условие убывания во времени функции Ляпунова или условие отрицательного знака полной производной по времени функции Ляпунова:

$$\frac{dV}{dt}=\frac{dV}{d\delta}\frac{d\delta}{dt}+\frac{dV}{dS}\frac{dS}{dt}\prec 0\,. \tag{3}$$

Из (2) имеем

$$\frac{dV}{d\delta}=-\left(P_{\text{Т}}-\frac{EU}{X}\sin\delta\right), \tag{4}$$

$$\frac{dV}{dS}=T_j S\,. \tag{5}$$

Подставляя в (3) производные (4) и (5), с учетом (1) получим

$$\frac{dV}{dt}=T_j S\frac{1}{T_j}\left(P_{\text{Т}}^0+\Delta P_{\text{Т}}-\frac{EU}{X}\sin\delta\right)-\left(P_{\text{Т}}^0-\frac{EU}{X}\sin\delta\right)S=S\Delta P_{\text{Т}}\prec 0\,. \tag{6}$$

Из (6) следует, что для того, чтобы имела место стабилизация переходного процесса, изменение мощности турбины в процессе управления $\Delta P_{\text{Т}}$ должно иметь знак, противоположный знаку скольжения S, т.е.

$$\Delta P_{\text{Т}}=-K_1 S, \tag{7}$$

где $K_1>0$ — постоянный коэффициент, численное значение которого выбирается таким образом, чтобы величина сигнала управления была достаточной для обеспечения экстренной разгрузки турбины в пределах её регулировочного диапазона. В реальных условиях изменение мощности турбины $\Delta P_{\text{Т}}$ осуществляют подачей сигнала управления в виде напряжения (тока) электрогидроприставки (ЭГП) u_1 к системе регулирования турбины. С учетом инерционности турбины процесс изменения её мощности упрощенно может быть описан уравнением

$$T_n\frac{d\Delta P_{\text{Т}}}{dt}=-\Delta P_{\text{Т}}+u_1, \tag{8}$$

где $T_{\text{п}}$ — эквивалентная постоянная времени турбины ($T_{\text{п}}=T_{\text{п}}^{\text{ОТКР}}$ при $u_1>0$; $T_{\text{п}}=T_{\text{п}}^{\text{ЗАКР}}$ при $u_1<0$); $\Delta P_{\text{Т}}^{\min}<\Delta P_{\text{Т}}<\Delta P_{\text{Т}}^{\max}$ — ограничения на допустимое изменение мощности турбины; $u_1^{\min}<u_1<u_1^{\max}$ — ограничения на величину управления.

С учетом (7) из (8) может быть получен вид управляющего воздействия (закон управления) для стабилизации переходного процесса в энергосистеме путем управления мощностью турбин:

$$u_1=-K_1 S-K_1 T_{\text{п}}\frac{dS}{dt}=-K_1\left(S+T_{\text{п}}\frac{dS}{dt}\right). \tag{9}$$

Закон управления (9) обеспечивает повышение устойчивости энергосистем и демпфирование переходного процесса.

Спецификой ПАУМТ в виде (9) является то, что обеспечивается стабилизация переходного процесса без учета требований его ввода в область динамической устойчивости заданного послеаварийного режима. При этом может возникнуть длительный режим автоколебаний.

Процесс ПАУМТ может быть улучшен, если наряду с управлением (9) использовать управление, обеспечивающее в переходном процессе минимизацию отклонения текущего значения функции Ляпунова (2) от её заданного значения $V_{\text{у}}$:

$$u_2 = -K_2\left[\Delta V + T_{п}\frac{d(\Delta V)}{dt}\right], \tag{10}$$

где $\Delta V=V(t)-V_{У}$; $V(t)$ — значение функции Ляпунова в текущий момент времени; $V_{У}$ — уставка ($V_{У}<V_{ГР}$). Величина уставки выбирается таким образом, чтобы поверхность уровня $V=V_{У}$ находилась внутри границы области устойчивости $V=V_{ГР}$.

На базе сочетания законов управления (9) и (10) может быть построен алгоритм ПАУМТ, основное содержание которого в следующем. На этапах переходного режима в энергосистеме, на которых не выявлено условие

$$V_t<V_{ГР}(t), \tag{11}$$

где V_t, $V_{ГР}(t)$ — текущие значения функции Ляпунова и её граничные значения соответственно, используется управление (9); при выполнении условия (11) используется управление (10).

Предложенный алгоритм обеспечивает повышение устойчивости энергосистем и стабилизацию возникающих переходных процессов к их режимам, имеющим заданные запасы статической и динамической устойчивости. Численные расчеты показали, что использование описанного алгоритма ПАУМТ обеспечивает возможность повышения допустимой нагрузки электростанции и повышение её надежной работы в условиях вероятных аварийных режимов энергосистемы.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Руководящие указания по устойчивости энергосистем. - М., 1994.
2. Бронштейн И.И., Семендяев К.А. Справочник по математике. - М.: Физматгиз, 1982.
3. Малкин И.Г. Теория устойчивости движения. - М., 1970.
4. Веников В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. - М.: Высшая школа, 1970.