

Выбор корректирующего управления для обеспечения динамической устойчивости волнового электромеханического процесса в энергосистеме

ЛИЗАЛЕК Н.Н., ВАСИЛЬЕВ В.В., БОРОДИН Д.Н., АРЖАННИКОВ С.Г.

В настоящее время все большую актуальность приобретают задачи оценки динамической устойчивости сложных энергосистем в рамках централизованной системы противоаварийного управления. Предлагается алгоритм выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости, основанный на представлении о структурно организованном волновом движении синхронных машин в энергосистеме. Выделив общесистемное поступательное движение и колебательные движения синхронных машин, можно сгруппировать энергосистему в подсистемы. Выявляемое структурное представление системы к моменту развития асинхронного хода сводит задачу анализа динамической устойчивости к оценке устойчивости двухмашинных схем. Для определения управляющих воздействий используется теорема об изменении кинетической энергии.

Ключевые слова: энергосистема, динамическая устойчивость, управляющие воздействия, система противоаварийного управления

Автоматика предотвращения нарушения устойчивости (АПНУ) в послеаварийных режимах ориентирована на выбор управляющих воздействий, обеспечивающих существование послеаварийного режима с запасом статической устойчивости, не меньше заданного [1, 2]. При этом предполагается, что динамический переход к послеаварийному режиму устойчив. Однако, в общем случае, необходимо удостовериться в динамической устойчивости переходного процесса, завершающегося установлением желаемого послеаварийного режима. При нарушении динамической устойчивости необходимо ввести дополнительное корректирующее управление, которое в совокупности с управлением, обеспечивающим существование послеаварийного режима с допустимым запасом, позволит действительно его осуществить.

В статье рассмотрен выбор корректирующего управления, проводимый на основе численного расчета переходного процесса с привлечением математической модели системы, функционирующей в рамках централизованной системы противоаварийного управления (ЦСПА), реализующей принцип управления 1-ДО. Численное интегрирование уравнений электромеханического переходного процесса энергосистемы при рассматриваемом возмущении дает совокупность изменяющихся во времени режимных параметров системы (поле траекторий, генерируемое той или иной вычислительной программой). Суждения об устойчивости динамического перехода необходимо делать на базе анализа этих траекторий.

Синхронное движение системы в любом переходном процессе представлено движением её центра инерции. Исследование устойчивости системы сводится к анализу колебательных движений, развивающихся в системе относительно её центра инерции. Эти колебания имеют волновой характер, что проявляется в образовании смежных областей системы (динамических подсистем), движущихся относительно центра инерции противоположным образом [3]. Эти области могут представлять пространственное распределение угловых скоростей или угловых смещений в каждый момент времени.

Электромеханические волны приводят к структурной организации относительного движения около центра инерции системы (определяют его колебательную структуру) [3]. Выявление изменяющейся во времени колебательной структуры в переходном процессе может быть проведено на базе основного топологического свойства волнового движения — его гребни и впадины в пространстве соседствуют. Границы между гребнями и впадинами волны наиболее вероятно определяют возможное положение сечений асинхронного хода.

Структурная организация движения в системе проявляется в группировке синхронных машин. Такие группы (ядра подсистем) формируют вокруг себя области системы, векторы напряжений в узлах которых перенимают характер движения группы. Признаком граничной связи, объединяющей две смежные подсистемы, может быть разный знак изменений угловых смещений векторов напряжения $\Delta\delta_{i0}(t, t_0)$ в узлах по её концам относи-

тельно центра инерции системы на интервале времени $(t_0 - t)$:

$$\Delta\delta_{i0}(t, t_0) = \delta_i(t) - \delta_i(t_0) - \frac{\sum_k J_k [\delta_{rk}(t) - \delta_{rk}(t_0)]}{J_\Sigma}, \quad (1)$$

где $\delta_{rk}(t) - \delta_{rk}(t_0)$ — изменение угла k -й синхронной машины с моментом инерции J_k (суммирование идет по всем синхронным машинам системы); J_Σ — суммарный момент инерции системы.

Углы в (1) измеряются относительно используемой в расчете переходного процесса оси отсчета.

Если все такие связи системы в момент времени t считать отключенными и провести топологический анализ системы на предмет выделения несвязных подсистем, то получившиеся подсистемы будут иметь общий признак — одинаковый знак изменений относительных угловых смещений внутри подсистемы, а любые смежные из подсистем будут характеризоваться разными знаками этих смещений. В зависимости от способа задания момента времени t_0 на основе (1) можно определять волну смещений или волну скоростей. При $t_0 = \text{const}$ получим волну накопленных к моменту времени t интегральных смещений. При выборе $t_0 = t - \Delta t = \text{var}$, где Δt — небольшой по значению постоянный шаг дискретизации процесса, полученная волна имеет смысл волны скоростей. Так как устойчивость параллельной работы определяется работами, производимыми при перемещениях, а моменты, совершающие эти работы, в основном зависят от взаимных углов, то обычно рассматривается волна смещений.

Описанный алгоритм позволяет определять колебательную структуру движения в системе как функцию времени $S(t)$ на каждом шаге расчёта переходного процесса. Используемый способ выделения структур движения предопределяет их топологические свойства. Они могут быть цепочечными, разветвлёнными цепочечными (в том числе звёздообразными) или содержать кольца из четного числа подсистем [3]. Для колебательных структур без колец разрыв любой связи приводит к делению системы на две части, которые в свою очередь могут рассматриваться как подсистемы, между которыми возможно развитие асинхронного хода (возможные структуры неустойчивости [3]). Внутри кольца деление на две части происходит при разрыве двух связей.

Процесс эволюции колебательной структуры во времени связан с неустановившимся волновым процессом в неоднородной системе с демпфированием. Изменения колебательной структуры могут иметь различную глубину и направленность. В подсистеме могут входить как десятки (сотни) син-

хронных машин, так и отдельные агрегаты. Наибольший интерес с точки зрения управления, обеспечивающего устойчивость, представляют достаточно простые структуры $S_{a,x}$, складывающиеся в системе к началу развития асинхронного хода. Эти колебательные структуры — простые по топологии совокупности небольшого числа относительно движущихся объектов (подсистем), характеристики неустойчивого взаимного движения которых на рассчитанной (т.е. известной) траектории нужно анализировать.

Задача выбора противоаварийного управления требует подробных знаний о процессе нарушения устойчивости. Простая констатация неустойчивости динамического перехода оказывается недостаточной. Необходимо определять сечение развивающегося асинхронного хода, учитывать связанные с его положением временные (темповые) и энергетические характеристики неустойчивого движения. Модифицированную задачу устойчивости, включающую в себя определение положения сечения асинхронного хода, будем называть задачей исследования распада синхронной работы (синхронизма) энергосистемы при действии возмущений. Исследования структурной организации электромеханических колебаний, обусловленной электромеханическими волнами, даёт возможность определять положение этих сечений. Использование термина «распад» позволяет одним словом обозначать процессы обособления тех или иных частей некогда целого объекта, запускаемые внешними и внутренними факторами.

При исследованиях энергетических характеристик движения удобно использовать его иерархическое разложение. Движения синхронных машин (их скорости и смещения) представляются суммой составляющих: поступательного движения центра инерции системы, колебательных движений центров инерции подсистем относительно центра инерции системы (региональные процессы) и колебаний машин относительно центров инерции подсистем (локальные процессы). Так, кинетическая энергия колебаний, рассматриваемых с позиции некоторой колебательной структуры S (например, сложившейся к моменту времени t), может быть разложена на сумму региональных и локальных составляющих в любой момент времени τ на основе соотношения [3]:

$$K_{\text{кол}}(\tau) = 0,5 \sum_s [J_s \Delta\Omega_{s0}^2(\tau) + \sum_{k_s} J_k \Delta\Omega_{rk_s}^2(\tau)]. \quad (2)$$

Здесь $\Delta\Omega_{s0}(\tau)$ — относительное отклонение скорости центра инерции s -й подсистемы с моментом

инерции J_s ; $\Delta\Omega_{\text{rks}}(\tau)$ — относительное отклонение скорости k -й машины в s -й подсистеме с множеством узлов k_s .

Из (2) видно, что определение составляющих кинетической энергии колебаний для некоторой отобранной колебательной структуры сводится к расчету относительных скоростей её объектов. Изменение выбираемой структуры приводит к изменению соотношения между региональными и локальными составляющими кинетической энергии колебания при неизменности их полной суммы.

Неустойчивая пара и энергетические характеристики её движений. Для идентификации неустойчивости необходимо выделить межсистемное сечение колебательной структуры, по которому происходит развитие асинхронного хода. Для этого можно воспользоваться вычислениями изменений взаимных углов между смежными подсистемами переменной колебательной структуры. Для смежных подсистем (s -й и m -й) интегральное изменение взаимного угла на каждом шаге расчёта в интервале $(t_0 - t)$ ($t_0 = \text{const}$):

$$\Delta\delta_{sm}(t, t_0) = \Delta\delta_{s0}(t, t_0) - \Delta\delta_{m0}(t, t_0) = \frac{\sum_{k_s} J_k [\delta_{\text{rk}}(t) - \delta_{\text{rk}}(t_0)]}{J_s} - \frac{\sum_{k_m} J_k [\delta_{\text{rk}}(t) - \delta_{\text{rk}}(t_0)]}{J_m},$$

где k_s и k_m — множества генераторных узлов s -й и m -й подсистем.

При этом выявление сечения, по которому развивается асинхронный ход, можно (и наиболее просто) проводить по признаку увеличения модуля изменения взаимных углов более чем на 180° [2] (координата неустойчивого положения равновесия, равная 180° , соответствует самому лёгкому режиму работы электропередачи — её холостому ходу; при всех других режимах она меньше). В момент выявления такой пары подсистем фиксируется колебательная структура $S_{\text{a.x}}$, движения объектов которой далее и анализируются уже на всём интервале интегрирования с использованием информации из поля траекторий.

Неустойчивой парой (НП) будем называть подсистемы, связанные между собой сечением развивающегося асинхронного хода. Она может быть образована двумя подсистемами колебательной структуры $S_{\text{a.x}}$, установленными при идентификации неустойчивости. В неё также могут входить подсистемы, образованные в результате полного или частичного слияния подсистем этой колебательной структуры, находящихся по разные стороны сечения асинхронного хода (если в структуре больше двух подсистем). Таким образом, НП мо-

жет охватывать часть системы или всю систему. Для упрощения будем полагать, что подсистемы, входящие в НП, имеют номера «1» и «2».

Определим относительную скорость центра инерции подсистемы, содержащей обе подсистемы НП, относительно центра инерции системы $\Delta\Omega_{(1+2)0}$ на основе соотношения:

$$J_1 \Delta\Omega_{10} + J_2 \Delta\Omega_{20} = (J_1 + J_2) \Delta\Omega_{(1+2)0},$$

где $\Delta\Omega_{10}(t)$ и $\Delta\Omega_{20}(t)$ — отклонения скорости первой и второй подсистем НП относительно центра инерции системы; J_1 и J_2 — моменты инерции подсистем.

Отклонения скоростей подсистем от скорости собственного центра инерции НП $\Delta\Omega_{1(1+2)}$ и $\Delta\Omega_{2(1+2)}$ равны:

$$\Delta\Omega_{1(1+2)} = \Delta\Omega_{10} - \Delta\Omega_{(1+2)0};$$

$$\Delta\Omega_{2(1+2)} = \Delta\Omega_{20} - \Delta\Omega_{(1+2)0}.$$

Для этих отклонений скорости будет всегда выполняться соотношение

$$J_1 \Delta\Omega_{1(1+2)} + J_2 \Delta\Omega_{2(1+2)} = 0.$$

Два уравнения движения подсистем НП относительно её собственного центра инерции будут иметь вид:

$$J_1 \frac{d(\Delta\Omega_{1(1+2)})}{dt} = \frac{\Delta M_1 J_2 - M_2 J_1}{J_1 + J_2} = \Delta M_{1(1+2)}; \quad (3)$$

$$J_2 \frac{d(\Delta\Omega_{2(1+2)})}{dt} = \frac{\Delta M_2 J_1 - M_1 J_2}{J_1 + J_2} = \Delta M_{2(1+2)}, \quad (4)$$

где ΔM_1 и ΔM_2 — абсолютные избыточные моменты подсистем «1» и «2»; $\Delta M_1 = \sum_{k_1} \Delta M_k$;

$$\Delta M_2 = \sum_{k_2} \Delta M_k; \quad \Delta M_k = \frac{\Delta P_k}{\Omega_{\text{rk}}}, \quad \Delta P_k — \text{небаланс мощ-$$

ности на валу k -й машины; k_1, k_2 — множества узлов, входящих в подсистемы «1» и «2»; $\Delta M_{1(1+2)}$ и $\Delta M_{2(1+2)}$ — относительные избыточные моменты подсистем «1» и «2», определяющие их относительные движения около собственного центра инерции НП, причем $\Delta M_{2(1+2)} = -\Delta M_{1(1+2)}$.

Кинетическая энергия региональных колебаний НП определяется как сумма кинетической энергии двух подсистем:

$$K_{\text{рег}(1+2)} = 0,5 J_1 \Delta\Omega_{10}^2 + 0,5 J_2 \Delta\Omega_{20}^2 = 0,5 (J_1 + J_2) \Delta\Omega_{(1+2)0}^2 + 0,5 J_1 \Delta\Omega_{1(1+2)}^2 + 0,5 J_2 \Delta\Omega_{2(1+2)}^2. \quad (5)$$

Из (5) видно, что часть кинетической энергии связана с общим движением НП, а также имеется

составляющая, определяемая внутренними региональными колебаниями подсистем НП около её собственного центра инерции:

$$K_{\text{вн}(1+2)} = 0,5J_1 \Delta\Omega_{1(1+2)}^2 + 0,5J_2 \Delta\Omega_{2(1+2)}^2.$$

Из (3) и (4) следует, что изменение $K_{\text{вн}(1+2)}$ равно интегралу работы относительного момента $\Delta M_{1(1+2)}$ на взаимном перемещении подсистем $\Delta\delta_{12}$:

$$\int_{t_0}^t dK_{\text{вн}(1+2)} = \int_{\Delta\delta_{12}(t_0)}^{\Delta\delta_{12}(t)} \Delta M_{1(1+2)} d(\Delta\delta_{12}), \quad (6)$$

где $d(\Delta\delta_{12}) = \Delta\Omega_{12} dt$ и $\Delta\Omega_{12} = \Delta\Omega_{1(1+2)} - \Delta\Omega_{2(1+2)}$.

Соотношение (6) представляет теорему об изменении кинетической энергии внутренних региональных колебаний НП, лежащую в основе алгоритмов анализа характеристик её неустойчивого взаимного движения.

К аналогичным соотношениям приводит известный прием преобразования дифференциальных уравнений движения, применённый для НП. Первое из них умножается на J_2 , второе — на J_1 , затем из первого вычитается второе. В результате получим одно дифференциальное уравнение взаимного движения подсистем:

$$\frac{J_1 J_2}{J_1 + J_2} \frac{d(\Delta\Omega_{1(1+2)} - \Delta\Omega_{2(1+2)})}{dt} = J_{\text{вз}} \frac{d(\Delta\Omega_{12})}{dt} \Delta M_{1(1+2)}. \quad (7)$$

Избыточный момент в правой части (7), определяющий взаимное движение подсистем, совпадает с избыточным моментом, действующим на первую подсистему в её относительном движении около собственного центра инерции НП. Величина $J_{\text{вз}}$ — момент инерции взаимного движения (приведённый момент инерции). Переход к описанию взаимного движения подсистем НП приводит к одномерной задаче исследования устойчивости движения синхронной машины с моментом инерции $J_{\text{вз}}$ при действии на неё избыточного момента $\Delta M_{1(1+2)}$. Кинетическая энергия взаимного движения, описываемого уравнением (7): $0,5J_{\text{вз}} \Delta\Omega_{12}^2$.

Если (7) преобразовать в интегральное соотношение типа (6), то можно установить, что кинетическая энергия взаимного движения подсистем НП равна суммарной кинетической энергии колебаний подсистем НП относительно её собственного центра инерции.

Региональные колебания подсистем неустойчивой пары относительно её центра инерции описываются соотношениями (3) и (4), взаимные движения — уравнением (7), внешне сходными с анало-

гичными соотношениями для двухмашинной схемы. Главное отличие сводится к тому, что избыточный момент, определяющий взаимное движение подсистем, зависит от полных траекторий движения синхронных машин всей системы (а не только от регионального взаимного смещения $\Delta\delta_{12}(t, t_0)$, как это было бы для идеализированной двухмашинной схемы).

Кинетическая энергия взаимных колебаний подсистем НП на некотором интервале времени может нарастать или убывать. В первом случае работа положительна, во втором отрицательна. Работу можно увязать с изменением потенциальной энергии: положительная работа соответствует уменьшению потенциальной энергии (спуск в потенциальную яму по нисходящей ветви цикла качаний с набором кинетической энергии), а отрицательная — подъёму из потенциальной ямы по восходящей ветви с возрастанием потенциальной и уменьшением кинетической энергии. Недостаточная (для приобретённой кинетической энергии) высота потенциального барьера при подъёме из потенциальной ямы по восходящей ветви цикла качаний выступает физической причиной развития асинхронного хода. Количественной оценкой недостаточной высоты потенциального барьера может выступать значение не преобразованной в работу при подъёме по восходящей ветви (т.е. избыточной) кинетической энергии $K_{\text{изб}}$, которой обладают подсистемы НП при переходе через его вершину.

Построить потенциальную яму на основе расчета переходного процесса можно отложив по оси ординат кинетическую энергию взаимных колебаний в некоторый момент времени, взятую с отрицательным знаком, а по оси абсцисс — взаимный угол $\Delta\delta_{12}(t, t_0)$, наблюдаемый в тот же момент времени. Понятно, что расчетные потенциальные ямы отражают в иной форме те же энергетические соотношения, что и известные графические построения метода площадей, отличаясь от последних использованием траекторий, удовлетворяющих уравнениям движения сложной системы. Кроме того, метод площадей используется, как правило, для оценки предельных возмущений, приводящих к неустойчивости. Исследование потенциальных ям ориентировано на поиск противоаварийного управления, предотвращающего нарушение устойчивости.

В связи с присутствием непотенциальных сил в энергосистеме представление о потенциальной яме не является строгим. Оно имеет иллюстративный характер и хорошо согласуется с повседневным опытом. Приведённые далее рисунки расчетных потенциальных ям упрощены: не показано несовпадение восходящих и нисходящих ветвей одного и

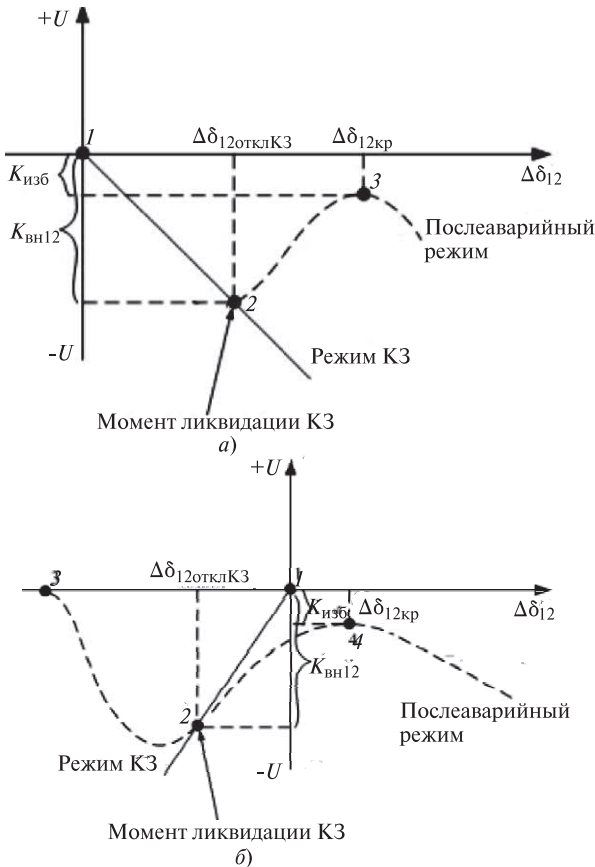


Рис. 1. Расчетная потенциальная яма при распаде по сечению НП: а — в первом цикле качаний; б — во втором

того же цикла качаний, связанное с демпфированием, отброшены проявления локальных движений. На рис. 1,а участок 1–2 – нисходящий склон потенциальной ямы в аварийном режиме, 2–3 – восходящая ветвь первого цикла качаний в послеаварийном режиме. Последовательность положений в потенциальной яме: 1–2–3.

На рис. 1,б участок 1–2 – склон потенциальной ямы в аварийном режиме, 3–2–4 – потенциальная яма в послеаварийном режиме. Выбегающая при распаде подсистема 1, в первом цикле качаний является отстающей; последовательность положений: 1–2–3–2–4.

На рис. 2 представлено устойчивое взаимное движение в первом и втором циклах качаний: последовательность положений: 1–2–3–2–4–2. Эти изображения качественно одинаковы для любых пар непосредственно связанных подсистем колебательной структуры (неустойчивая пара отсутствует). Если устойчивость сохраняется и в последующих циклах качаний, то при наличии демпфирования можно говорить об уменьшении размеров потенциальной ямы этих пар на последующих этапах движения по вертикальному и горизонтальному направлениям (они стягиваются в точки устойчивого положения равновесия пар в послеаварийном ре-

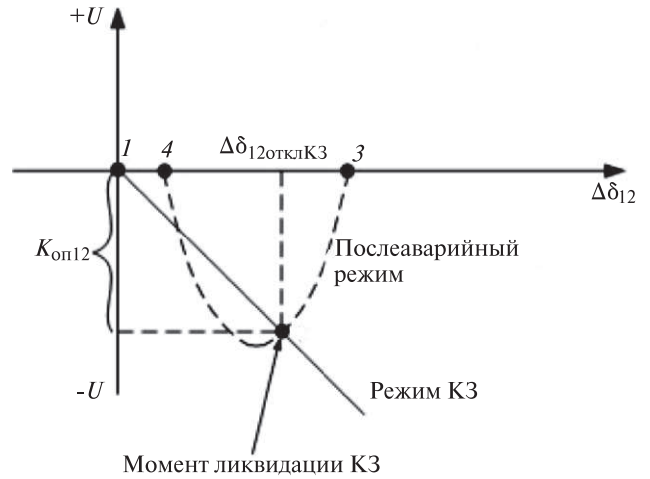


Рис. 2. Расчетные потенциальные ямы пар подсистем при устойчивом движении в первом и втором циклах качаний

жиме). При отрицательном демпфировании (самораскачивании) размеры некоторых потенциальных ям увеличиваются, а их форма искажается вплоть до появления неустойчивой пары.

При фиксированной колебательной структуре, используемой на всём протяжении переходного процесса, в моменты коммутаций, не сопровождающихся изменением инерционной массы, скорости движения центров инерции системы и подсистем, а также их кинетическая энергия неизменны. При изменениях вращающихся масс эти характеристики движения также изменяются.

Кроме регионального движения синхронные машины подсистем НП участвуют в локальных колебаниях около центра инерции подсистемы, в которую они входят, со скоростями:

$$\Delta\Omega_{rk1}(t) = \Delta\Omega_{rk0}(t) - \Delta\Omega_{10}(t);$$

$$\Delta\Omega_{rk2}(t) = \Delta\Omega_{rk0}(t) - \Delta\Omega_{20}(t),$$

где $\Delta\Omega_{rk0}(t)$ – изменение скорости генератора относительно центра инерции системы.

Кинетическая энергия локальных колебаний подсистем НП:

$$K_{лок1}(t) + K_{лок2}(t) = 0,5 \sum_{k_1} J_{k1} \Delta\Omega_{rk1}^2(t) + 0,5 \sum_{k_2} J_{k2} \Delta\Omega_{rk2}^2(t).$$

В каждой подсистеме будут присутствовать синхронные машины, скорости вращения которых будут либо больше, либо меньше скорости перемещения центра инерции подсистемы. Синхронные машины подсистем разделим на две группы, опережающие центр инерции подсистемы и отстающие от него. Тогда величины $K_{лок1}(t)$ и $K_{лок2}(t)$ можно представить в виде сумм:

$$\begin{aligned}
K_{\text{лок1}}(t) &= K_{\text{лок1}}^+(t) + K_{\text{лок1}}^-(t) = \\
&= 0,5 \sum_{k_1, \Delta\Omega_{\text{гk1}} > 0} J_{k1} \Delta\Omega_{\text{гk1}}^2(t) + \\
&+ 0,5 \sum_{k_1, \Delta\Omega_{\text{гk1}} < 0} J_{k1} \Delta\Omega_{\text{гk1}}^2(t); \\
K_{\text{лок2}}(t) &= K_{\text{лок2}}^+(t) + K_{\text{лок2}}^-(t) = \\
&= 0,5 \sum_{k_2, \Delta\Omega_{\text{гk2}} > 0} J_{k2} \Delta\Omega_{\text{гk2}}^2(t) + \\
&+ 0,5 \sum_{k_2, \Delta\Omega_{\text{гk2}} < 0} J_{k2} \Delta\Omega_{\text{гk2}}^2(t),
\end{aligned}$$

собирающих в одном слагаемом синхронные машины, опережающие по скорости центр инерции подсистемы, а в другом — машины, отстающие от него.

При выходе на вершину потенциального барьера изменения взаимных углов и моментов, обусловленных взаимным региональным движением подсистем НП, уменьшаются. Всё большее значение приобретают не взаимные региональные смещения подсистем НП, а другие составляющие движения. Это означает, что управление по обеспечению устойчивости, основанное на анализе характеристик региональных взаимных движений подсистем НП, на вершине потенциального барьера сталкивается с принципиальной неопределённостью. Можно предложить приближённый подход, позволяющий в этих условиях решать задачи управления. Выбор управляющих воздействий, обеспечивающих устойчивость регионального взаимного движения, надо проводить с некоторым запасом на неполное знание путем отступа от вершины потенциального барьера на значение, определяемое энергетическими характеристиками неучитываемых движений. Управление должно обеспечивать достаточную удалённость траекторий регионально-го движения от вершины потенциального барьера, достигаемой неуправляемой системой при критическом взаимном смещении $\Delta\delta_{12\text{кр}}$ в момент $t_{\text{кр}}$.

В момент достижения критического регионального смещения между подсистемами НП можно определить их региональную $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}})$ и локальную кинетическую энергию. При этом целесообразно выделить ту составляющую локальной кинетической энергии, которая связана с локальным движением синхронных машин в подсистемах, происходящих в ту же сторону, что и региональное движение подсистемы, в которую они входят. Если ускоряющаяся после нарушения устойчивости подсистема имеет номер «1», то эта составляющая ло-

кальной кинетической энергии определится как $K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})$:

$$\begin{aligned}
K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) &= 0,5 \sum_{k_1, \Delta\Omega_{\text{гk1}}(t_{\text{кр}}) > 0} J_{k1} \Delta\Omega_{\text{гk1}}^2(t_{\text{кр}}); \\
K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}}) &= 0,5 \sum_{k_2, \Delta\Omega_{\text{гk2}}(t_{\text{кр}}) < 0} J_{k2} \Delta\Omega_{\text{гk2}}^2(t_{\text{кр}}).
\end{aligned}$$

Пусть $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}}) = 0$ и региональные движения НП имеют точку останова в момент $t_{\text{кр}}$. Величину $K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})$ можно трактовать как неопределенность вычисления кинетической энергии. Это значит, что величина $K_{\text{изб}}$ не должна приниматься равной нулю из-за равенства нулю $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}})$. Её следует выбрать равной $K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})$. Если $K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}})$ не равна нулю, то $K_{\text{изб}}$ можно, например, выбирать так:

$$K_{\text{изб}} = \max(K_{\text{вн}(1+2)}(t_{\text{кр}}), K_{\text{лок1}}^+(t_{\text{кр}}) + K_{\text{лок2}}^-(t_{\text{кр}})).$$

Выбор корректирующего управления по динамической устойчивости. Нарушения динамической устойчивости управляемого АПНУ перехода к послеаварийному режиму, устойчивому по статике, могут быть связаны:

с недостаточной высотой защитных потенциальных барьеров в первом или последующих циклах качаний для предусмотренных ЦСПА аварий;

запаздыванием ввода управляющих воздействий при этих авариях;

проходящими возмущениями, увеличивающими кинетическую энергию колебаний, не предусмотренных в ЦСПА.

Общий порядок расчетов при выборе управления:

рассчитывается переходный процесс с вводом управляющих воздействий по условию обеспечения статической устойчивости в послеаварийном режиме в момент времени $t_{\text{ус}}$;

в случае идентификации неустойчивого переходного процесса определяются сечение асинхронного хода и корректирующее управление;

расчет переходного процесса повторяется с вводом выбранного управления для проверки его результативности, при идентификации распада по тому же или другому сечению повторяется предыдущий пункт.

Основные этапы выбора корректирующего управления по динамической устойчивости приведены далее.

1. *Выявление неустойчивой пары* в условиях переменной колебательной структуры и определение

времени идентификации неустойчивости $t_{и.н}$ при расхождении взаимного угла двух смежных подсистем более чем на 180° . Определение структуры $S_{а.х}$.

2. *Определение отклонения скоростей подсистем НП от её собственного центра инерции* $\Delta\Omega_{1(1+2)}(t)$ и $\Delta\Omega_{2(1+2)}(t)$ в момент $t_{и.н}$. Присвоение выбегающей подсистеме номера «1», а отстающей – «2».

3. *Определение времени изменения знака относительного момента* $t_{изм.зн}^k$. Это позволяет определить моменты наступления экстремальных (максимальных и минимальных) отклонений относительных скоростей подсистем НП от скорости её центра инерции. Получение пустого множества времён изменения знака обозначает отсутствие послеаварийного режима или чрезмерно позднее введение управления по обеспечению его существования (в этом случае корректирующее управление не выбирается).

4. *Определение времени достижения критического смещения* $t_{кр}$. Проводится путем анализа значений $K_{вн(1+2)}(t)$ на множестве $t_{изм.зн}^k$. Для этого, начиная с последнего элемента множества, при пошаговом перемещении к его началу (движение в сторону уменьшения времени) определяется момент времени, в который кинетическая энергия достигает минимума в точках минимума $\Delta\Omega_{1(1+2)}$. Дополнительно контролируется знак углового смещения между подсистемами $\Delta\delta_{12}$, которое должно быть положительным.

5. *Определение избыточной кинетической энергии* $K_{изб}$. Проводится после сопоставления величин $K_{вн(1+2)}(t_{кр})$ и $K_{лок1}^+(t_{кр}) + K_{лок2}^-(t_{кр})$.

6. *Определение времени внесения управляющих воздействий для обеспечения динамической устойчивости* $t_{у.д}$. Интервал времени, в котором осуществляется воздействие, должен содержать колебательные структуры, совпадающие со структурой $S_{а.х}$ или близкие к ней. Время $t_{у.д}$ определяется в момент достижения максимума $K_{вн(1+2)}(t_{кр})$ при положительном отклонении $\Delta\Omega_{1(1+2)}(t_v)$. Оптимальным выбором является время, при котором реализуется максимальное изменение региональной кинетической энергии НП при минимальном значении управляющего воздействия (см. п. 7).

7. *Расчет управляющего воздействия – отключение генераторов в избыточной подсистеме 1.* Отключение генераторов в избыточной подсистеме (наиболее часто употребляемое управляющее воздействие) приводит к изменению кинетической энергии регионального движения подсистем НП в переходном процессе за счёт двух факторов: за счёт уменьшения вращающейся массы, за счет совершения

дополнительной работы на восходящей ветви цикла качаний. Оценить первый фактор можно на основе соотношения

$$\Delta K_{вн(1+2)} \approx 0,5 \Delta J_1 \Delta \Omega_{1(1+2)}^2(t_{у.д}),$$

где ΔJ_1 – момент инерции отключаемой части генерации; $\Delta \Omega_{1(1+2)}^2(t_{у.д})$ – отклонение скорости выбегающей подсистемы НП относительно её центра инерции в момент ввода корректирующего управления; или другого соотношения:

$$\begin{aligned} \Delta K_{вн(1+2)} &\approx \frac{\Delta J_1}{J_1} J_1 \frac{\Delta \Omega_{1(1+2)}^2(t_{у.д})}{2} \approx \frac{\Delta J_1}{J_1} K_{вн1}(t_{у.д}) \approx \\ &\approx \frac{\Delta P_{Т1}}{P_{Т1}(t_{у.д})} K_{вн1}(t_{у.д}), \end{aligned}$$

где $\Delta P_{Т1}$ – отключаемая мощность турбин в подсистеме «1»; $P_{Т1}(t_{у.д})$ – мощность турбин в подсистеме «1» в момент ввода корректирующего управления; $K_{вн1}(t_{у.д})$ – кинетическая энергия выбегающей подсистемы «1» в тот же момент времени.

Второй фактор: дополнительно преобразуемая (в потенциальную энергию) кинетическая энергия $\Delta K_{вн(1+2)}^{пот}$. Она определяется изменением суммарного момента турбин отключаемых генераторов выбегающей подсистемы $\Delta M_{Т1(1+2)}$ и прогнозируемым угловым смещением $\Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{у.д})$. С учётом (3)

$$\begin{aligned} \Delta K_{вн(1+2)}^{пот} &\approx \Delta M_{Т1(1+2)} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{у.д}) \approx \\ &\approx \frac{\Delta M_{Т1} J_2}{J_1 + J_2} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{у.д}) \approx \frac{\Delta P_{Т1} J_2}{\Omega_{ном} (J_1 + J_2)} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{у.д}), \end{aligned}$$

где $\Omega_{ном} = 100\pi$ и $\Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{у.д}) \geq 0$.

Тогда, полагая, что

$K_{изб} = \Delta K_{вн(1+2)} + \Delta K_{вн(1+2)}^{пот}$, определим мощность турбин отключаемых генераторов в выбегающей части системы $\Delta P_{Т1}$:

$$\begin{aligned} \Delta P_{Т1} &\approx \frac{K_{изб}}{\frac{K_{вн1}(t_{у.д})}{P_{Т1}(t_{у.д})} + \frac{J_2}{\Omega_{ном} (J_1 + J_2)} \Delta\delta_{12}(t_{кр}, t_{у.д})} \end{aligned} \quad (8)$$

Минимизация объема отключения достигается при наибольшем значении знаменателя в выражении (8). Это обеспечивается выбором момента ввода управляющих воздействий, в котором реализуется суммарный максимум дополнительной работы

торможения и выбывающей (из оборота) кинетической энергии.

8. *Распределение управляющего воздействия в избыточной подсистеме.* Распределение проводится между электростанциями, привлечёнными к управлению. Рассчитывается локальная кинетическая энергия управляемых синхронных машин, опережающих центр инерции выбегающей подсистемы «1» в момент ввода управления:

$$K_{\text{лок1у}}^+(t_{\text{у.д}}) = 0,5 \sum_{k_1 \in k_{1\text{у}}, \Delta\Omega_{\text{гk1}}(t_{\text{у.д}}) > 0} J_{k1} \Delta\Omega_{\text{гk1}}^2(t_{\text{у.д}}).$$

Если $K_{\text{лок1у}}^+(t_{\text{у.д}}) = 0$ (в подсистеме только одна машина), задача распределения не рассматривается. Определяется относительный вклад управляемой и одновременно опережающей машины в эту кинетическую энергию:

$$\mu_k = 0,5 \frac{J_k \Delta\Omega_{\text{гk1}}^2(t_{\text{у.д}})}{K_{\text{лок1у}}^+(t_{\text{у.д}})}.$$

Определяется управляющее воздействие на управляемую и опережающую машину:

$$\Delta P_{\text{т1k}} = \mu_k \Delta P_{\text{т1}}.$$

Если $\Delta P_{\text{т1k}}$ меньше некоторого заданного значения, то это управляющее воздействие переносится на другую машину. Если $\Delta P_{\text{т1k}}$ больше заданного, то управляющее воздействие ограничивается, избыточное управление переносится на другую машину.

На рис. 3 отображены некоторые параметры временной реализации процесса, используемые при выборе управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости.

Воздействие противоаварийной автоматики на вид расчётной потенциальной ямы отображено на рис. 4. Показан случай распада неуправляемой

системы во втором цикле качаний, изображённый на рис. 1,а. В момент, представленный позицией 5, находящейся в конце нисходящей ветви первого цикла качаний, проводится отключение генератора. Изменение кинетической энергии между положениями 5–6 связано с уменьшением инерционной массы выбегающей подсистемы. Участок 6–7 представляет восходящую устойчивую ветвь второго цикла качаний. Последовательность положений внутри потенциальной ямы в первом и втором циклах качаний: 1–2–3–5–6–7–6.

Заключение. Волновое движение обуславливает группировку синхронных машин в подсистемы, изменяющуюся во времени. Для разбиения на подсистемы могут использоваться колебательные структуры, выявляемые при расчёте переходного процесса. Выделение колебательных структур, идентификация неустойчивости и определение неустойчивой пары могут проводиться на каждом шаге расчёта.

Построение систем противоаварийного управления требует модификации классической постановки задач устойчивости как задач исследования распада синхронной работы системы при возмущениях. При этом вопрос о положении сечения асинхронного хода становится неотъемлемой частью расчётных алгоритмов.

Анализ процессов распада синхронизма сложных энергосистем можно проводить на основе расчёта кинетической энергии взаимных колебаний неустойчивой пары колебательной структуры для оценки недостаточности высоты потенциального барьера, защищающего систему от нарушения устойчивости.

Идентификация неустойчивой пары подсистем определяет сечение асинхронного хода. Энергетической характеристикой распада становится избыточная кинетическая энергия взаимного движения

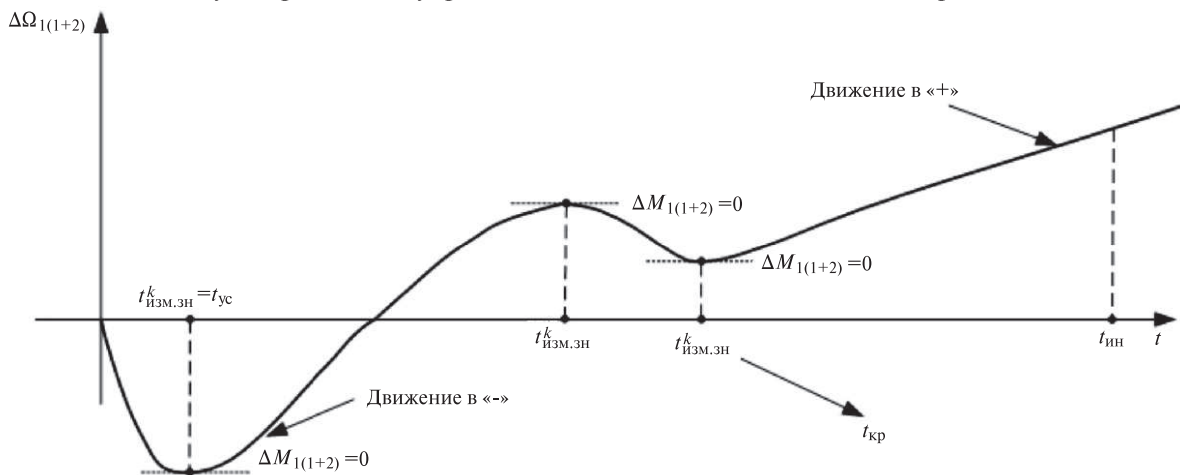


Рис. 3. Отклонение скорости первой подсистемы неустойчивой пары относительно ее центра инерции; нарушение динамической устойчивости во втором цикле качаний

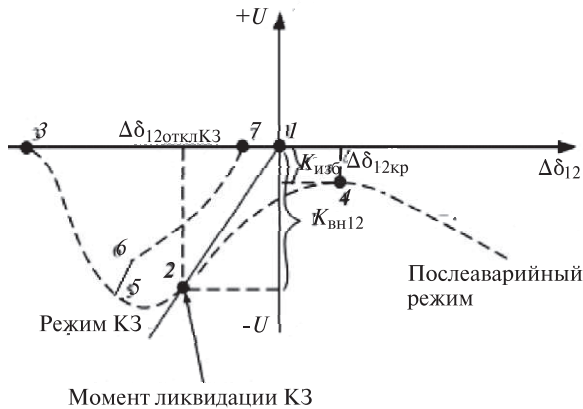


Рис. 4. Изменение расчётной потенциальной ямы при успешном действии противоаварийной автоматики, предотвращающей распад во втором цикле качаний

подсистем неустойчивой пары. Временной (темповой) характеристикой распада служит время достижения ими критического взаимного смещения.

Выбор управления проводится на основе накопленной информации в поле траекторий системы. Последнее обеспечивает независимость алгоритма выбора управления от вида адекватной математической модели системы, используемой для расчёта электромеханического переходного процесса. Необходимо только, чтобы эта модель поставляла информацию об угловых скоростях, угловых смещениях и избыточных моментах (мощностях).

Особенностями описанного алгоритма выбора управляющих воздействий по условию обеспечения динамической устойчивости являются:

определение сечения нарушения устойчивости проводится на основе анализа колебательных движений, развивающихся в системе в пространстве и времени; это позволяет формализовать поиск опасного сечения;

при поддержании актуальности динамической модели обеспечивается адаптивность выбора корректирующего противоаварийного управления к изменениям схемы и режима за счёт выявления актуальной неустойчивой пары;

определение управляющего воздействия проводится на основе оценки избытка кинетической энергии взаимного регионального движения неус-

Elektrichestvo (Electricity), 2017, No. 2, pp. 4–13.

тойчивой пары, который и приводит к распаду по её сечению; значение избытка кинетической энергии может учитывать неопределённость, связанную с существованием локальных движений;

объём управляющих воздействий вида «отключение генератора» определяется с учётом изменений вращающейся массы и дополнительной работы торможения взаимного движения подсистем неустойчивой пары.

Алгоритм применим для выбора управления с целью предотвращения распада системы на любом цикле качаний.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аржанников С.Г., Вторушин А.С., Захаркин О.В., Ландман А.К., Петров А.Э., Попова Е.Ю. Алгоритмическое обеспечение ПТК верхнего уровня ЦСПА ОЭС Сибири и перспективы его развития. — Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2013, № 1 (68), с. 91–98.
2. Лисицын А.А., Эдлин М.А. Алгоритм выбора управляющих воздействий по условиям динамической устойчивости. — Известия НТЦ Единой энергетической системы, 2013, № 1 (68), с. 41–47.
3. Лизалек Н.Н., Ладнова А.Н., Тоньшев В.Ф., Данилов М.В., Мочалин К.С. Структура электромеханических колебаний и устойчивость энергосистем. — Электричество, 2011, № 6, с. 11–19.

[21.09.2016]

А в т о р ы: Лизалек Николай Николаевич окончил электроэнергетический факультет (ЭЭФ) Новосибирского электротехнического института (НЭТИ) в 1969 г. В 1994 г. защитил докторскую диссертацию в Новосибирском государственном техническом университете (НГТУ) «Анализ динамических свойств энергообъединений на основе волнового подхода». Главный научный сотрудник АО «Институт автоматизации энергетических систем» («ИАЭС, Новосибирск»), профессор кафедры НГТУ.

Васильев Владимир Владимирович в 2007 г. окончил НГТУ. В 2011 г. в НГТУ защитил кандидатскую диссертацию «Разработка автоматики комплексного аварийного управления нагрузкой». Главный специалист АО «ИАЭС», доцент кафедры электрических станций НГТУ.

Бородин Дмитрий Николаевич в 2013 г. окончил магистратуру НГТУ. Инженер АО «ИАЭС».

Аржанников Сергей Гаврилович окончил НЭТИ в 1976 г. Старший научный сотрудник АО «ИАЭС».

Correction Control Selection for Power System Transient Stability of Electromechanical Wave Process

LIZALEK Nikolay Nikolayevich (JSC «Power System Automation Institute» («PSAI»), Novosibirsk, Russia) — Chief Scientific Researcher, Dr. Sci. (Eng.)

VASIL'EV Vladimir Vladimirovich (JSC «PSAI», Novosibirsk, Russia) — Senior Specialist, Cand. Sci. (Eng.)