

ности пространства разложения. При синтезе оптимального базиса были учтены особенности решения некорректных обратных задач. Преимущество алгоритма заключается в том, что сначала вычисляются коэффициенты разложения известной функции $U(\rho, \theta)$, а затем найденные коэффициенты делятся на соответствующие собственные чи-

сла. В результате получаются коэффициенты разложения искомой функции распределение зарядов $\sigma(\rho, \theta)$. При необходимости получить единичное распределение зарядов $\sigma(\rho, \theta)=1$ достаточно представить разложение потенциальной функции $U(\rho, \theta)$ в виде суммы собственных функций с единичными коэффициентами разложения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев Ю.Н., Кулешова Е.О., Васильева О.В., Русол Д.А. Расчет распределения зарядов пластин при наличии внешнего несимметричного поля // Известия Томского политехнического университета. – 2008. – Т. 312. – № 4. – С. 70–75.
2. Миролубов Н.Н., Костенко М.В., Левинштейн М.Л., Тиходев Н.Н. Методы расчета электростатических полей. – М.: Высшая школа, 1963. – 415 с.
3. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я., Тимонов А.А. Математические методы компьютерной томографии. – М.: Наука, 1985. – 160 с.
4. Преображенский Н.Г., Пикалов В.В. Неустойчивые задачи диагностики плазмы. – Новосибирск: Наука, 1982. – 238 с.
5. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректно поставленных задач. – М.: Наука, 1986. – 286 с.
6. Баринев В.А., Совалов С.А. Режимы энергосистем: методы анализа и управления. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 440 с.

Поступила 05.05.2008 г.

УДК 621.311.001

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ И СТРУКТУР СОБСТВЕННЫХ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ

С.В. Шиловский

Институт автоматизации энергетических систем, г. Новосибирск
E-mail: shi@iaes.ru

Предлагается решение системы дифференциальных уравнений электромеханических движений в виде гармонической функции. Рассматриваются вопросы определения закономерностей формирования спектров и структур собственных электромеханических колебаний. Исследуются оценки гармонического состава электромеханических колебаний. Обосновывается применение частот собственных колебаний в качестве показателей для оценки удаленности режима от предельного по устойчивости.

Введение

Анализ условий обеспечения статической и динамической устойчивости, электромеханических переходных процессов при научных исследованиях, в практике проектирования и эксплуатации имеет своей целью найти упрощенное с точки зрения устойчивости описание энергообъединения, обнаружить некоторые достаточно простые свойства объединенной электроэнергетической системы. В основе таких упрощенных представлений всегда лежит некоторое отображение системы в рассматриваемой области ее функционирования [1].

Объективный анализ устойчивости объединения целесообразно проводить с помощью процедур исследования, основанных на численной оценке ее системных свойств. В основе этих процедур предлагается учитывать реакцию системы на возмущения. Тогда объединение в своем движении должно проявлять свои динамические свойства [2–6].

В основе электромеханических переходных процессов энергообъединений лежат свободные колебательные движения синхронных машин.

Свободное движение, совершаемое под действием только внутренних сил, комплексно отражает и проявляет динамические свойства системы. Выявить их можно на основе исследования линеаризованных математических моделей. Качественно рассмотрение динамических свойств энергосистем базируется на предельно простой математической модели. Она ориентирована на описание процессов в системах, составленных из большого количества дискретных, упруго связанных между собой колеблющихся сосредоточенных элементов, в которых распределена вся инерционная масса системы. В качестве последних выступают синхронные машины [1].

В основу анализа устойчивости естественно положить изучение реакции системы на возмущения в виде гармонических колебаний с частотами, соответствующими собственным частотам электромеханической системы, а динамические свойства целесообразно исследовать для представительного набора собственных частот, оценивая гармонический состав электромеханических колебаний и используя частоты собственных колебаний для числовых оценок удаленности режима от предельного.

Методика исследований

Электромеханические процессы в объединении при колебаниях описываются системой линейаризованных уравнений:

$$\frac{(T_{ji} \cdot P_{ni})}{\omega_0} \cdot \frac{d^2 \Delta \delta_i}{dt^2} = - \sum_{r=2}^n \frac{dP_i}{d\delta_{1r}} \cdot \Delta \delta_{1r}, \quad (1)$$

где T_{ji} – постоянная инерции i -ого генератора, P_{ni} – номинальная мощность i -ого генератора, δ_i – угол вектора ЭДС i -ого генератора, $\Delta \delta_i$ – малые отклонения угла вектора ЭДС i -ого генератора за малый интервал времени, P_i – текущая активная мощность i -ого генератора, $P_i = \sum_{r=1}^n E_i \cdot E_r \cdot Y_{ir} \sin \delta_{ir}$,

$\delta_{ir} = \delta_i - \delta_r$, δ_{ir} – взаимный угол между векторами ЭДС первого и r -ого генераторов, $\Delta \delta_{ir}$ – малые отклонения взаимного угла между векторами ЭДС первого и r -ого генераторов за малый интервал времени, n – множество генераторных узлов в схеме сети, $\omega_0 = 314$ рад/с.

Решение уравнения (1) ищется в виде:

$$\Delta \delta_i(t) = \sum_{k=1}^{n-1} \Delta \delta_{ik} \cdot \sin(\omega_k t + \varphi_k). \quad (2)$$

Полученное при подстановке k -й компоненты в (1) выражение преобразуется к виду:

$$\left\{ \sum_{r=1}^n \frac{dP_{ir}}{d\delta_{ir}} - \frac{T_{ji} \cdot P_{ni} \cdot \omega_k^2}{\omega_0} \right\} \times \times \Delta \delta_i - \sum_{r=1}^n \frac{dP_{ir}}{d\delta_{ir}} \cdot \Delta \delta_r = 0, i \in n. \quad (3)$$

Частоты собственных колебаний $\omega_1, \dots, \omega_k, \dots, \omega_{n-1}$, на которых осуществляются движения, определяются из условия равенства нулю определителя матрицы коэффициентов системы уравнений (3) как:

$$\det \begin{vmatrix} C_{11} & C_{12} & \dots & C_{1n} \\ C_{21} & C_{22} & \dots & C_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{n1} & C_{n2} & \dots & C_{nn} \end{vmatrix} = 0, \quad (4)$$

где диагональные и недиагональные элементы соответственно равны:

$$C_{ii} = \sum_{r=1}^n \frac{dP_{ir}}{d\delta_{ir}} - \frac{T_{ji} \cdot P_{ni} \cdot \omega_k^2}{\omega_0}; \quad C_{ir} = - \frac{dP_{ir}}{d\delta_{1r}}.$$

Подстановка k -й составляющей частоты ω_k , полученной из соотношения (4), в систему уравнений (3) позволяет найти только соотношения амплитуд собственных колебаний углов роторов генераторов на частоте ω_k в виде коэффициентов распределения, связанных со значениями отклонений углов $\Delta \delta_{ik}$ выражениями:

$$K_{1k} = \Delta \delta_{1k} / \Delta \delta_{ik}, K_{2k} = \Delta \delta_{2k} / \Delta \delta_{ik}, \\ K_{3k} = \Delta \delta_{3k} / \Delta \delta_{ik}, K_{ik} = 1, \dots, K_{nk} = \Delta \delta_{nk} / \Delta \delta_{ik}.$$

Гармонический состав электромеханических колебаний зависит от места и вида возмущения и ее можно найти только при реальном возмущении путем суперпозиции всех гармоник в соответствии с выражением [7]:

$$\Delta \delta_i = \sum_{k=1}^{n-1} K_{ik} \cdot A_k \cdot \sin(\omega_k t + \varphi_k), \quad (5)$$

где A_k – определяет долю K_{ik} составляющей в общем движении i -ого генератора.

Для определения неизвестных A_k рассматривается система $n-1$ уравнений:

$$\sum_{k=1}^{n-1} A_k \cdot \omega_k^2 \cdot (K_{ik} - K_{nk}) / \omega_0 = \frac{F_i}{P_{ni} T_{ji}} - \frac{F_n}{P_{nn} T_{jn}}. \quad (6)$$

В правую часть уравнений (6) входят F_i , воспринимаемые каждым генератором в виде сбросов или набросов мощности.

Спектры и структуры собственных электромеханических колебаний системы

Закономерности образования спектров и структур собственных электромеханических колебаний определены по полученным результатам анализа решений уравнений (1, 3) для схем разной сложности. Они показали следующее:

1. С изменением режима и схемы меняется реакция системы на возмущения, выражающаяся в изменении значений частот и амплитуд собственных колебаний, определяющихся функцией вида (2). Каждой точке режима многомерной области устойчивости соответствует их определенное соотношение, изменяющееся при изменении режима. Снижение одной из частот до нуля говорит об утяжелении режима до предельного по устойчивости, появление аperiodической составляющей указывает на неустойчивость режима. Из этого следует, что для схемы любой сложности значения частот собственных колебаний системы ω являются числовыми показателями, с помощью которых можно характеризовать режим работы системы с точки зрения устойчивости и оценивать удаленность режима от предельного. Эти частоты в полной мере отражают состояние всего объединения в целом, т. е. являются обобщенными его показателями, и могут использоваться для целей анализа устойчивости и противоаварийного управления [8, 9].

2. Для простейших одномашинной (станция работает на шины бесконечной мощности) и двухмашинной позиционной консервативной схем имеется только одна составляющая в выражении (2). Ее частота колебаний определяется аналитически:

- для одномашинной схемы:

$$\begin{aligned} &= \omega_0 \cdot \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \cdot \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} \right) = \omega_0 \cdot P_{12}^m \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} \right) \cdot \cos \delta_{12} = \\ &= \omega_0 \cdot \frac{1}{X_{12}} \cdot \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} \right) \cdot \underbrace{E_1 E_2 \cos \delta_{12}}_{\text{параметры режима}} = \\ &= \omega_0 \cdot \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} \right) \cdot \sqrt{(P_{12}^m)^2 - P_{12}^2}; \end{aligned} \quad (7)$$

- для двухмашинной схемы:

$$\begin{aligned} \omega^2 &= \omega_0 \cdot \frac{dP_{12}}{d\delta_{12}} \cdot \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} + \frac{1}{T_{j2} \cdot P_{n2}} \right) = \\ &= \omega_0 \cdot P_{12}^m \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} + \frac{1}{T_{j2} \cdot P_{n2}} \right) \cdot \cos \delta_{12} = \\ &= \omega_0 \cdot \frac{1}{X_{12}} \cdot \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} + \frac{1}{T_{j2} \cdot P_{n2}} \right) \cdot \underbrace{E_1 E_2 \cos \delta_{12}}_{\text{параметры режима}} = \\ &= \omega_0 \cdot \left(\frac{1}{T_{j1} \cdot P_{n1}} + \frac{1}{T_{j2} \cdot P_{n2}} \right) \cdot \sqrt{(P_{12}^m)^2 - P_{12}^2}, \end{aligned} \quad (8)$$

где $P_{12}^m = \frac{E_1 \cdot E_2}{X_{12}}$, δ_{12} – взаимный угол между векторами ЭДС роторов генераторов первой и второй станций, E_1 , E_2 – модули ЭДС генераторов первой и второй станций; T_{j1} , T_{j2} – постоянные инерции генераторов первой и второй станций, P_{n1} , P_{n2} – номинальные мощности генераторов первой и второй станций; X_{12} – взаимное реактивное сопротивление между генераторами первой и второй станций, P_{12} – переток активной мощности по связи 1–2.

Значения ω и ω^2 зависят от схемы и режима работы системы.

Влияние схемы выражается в снижении ω при увеличении взаимного сопротивления X_{12} , вращающихся мощностей генераторов P_{n1} , P_{n2} , их постоянных инерций T_{j1} , T_{j2} и ее росте с увеличением структурного максимума (предела мощности) P_{12}^m . Влияние режима проявляется в снижении собственной частоты при увеличении загрузки связи между генераторами P_{12} , росте взаимного угла δ_{12} и снижении ЭДС E_1 , E_2 .

При росте перетока P_{12} снижение ω и ω^2 происходит неравномерно – при малых перетоках достаточно медленно, а при дальнейшем их увеличении значительно большими темпами, таблица.

Увеличение перетока P_{12} до соответствующего работе согласно «Методическим указаниям по устойчивости энергосистем» с 20 % запасом по устойчивости приводит к снижению ω на 22,4 % от максимальной ее величины, с 8 % запасом – на 37,6 %.

Зависимости ω и ее квадратной формы ω^2 от взаимного угла δ_{12} также носят нелинейный характер, рис. 1.

Таблица. Влияние изменения перетока P_{12} на собственную частоту колебаний системы ω и ω^2

Диапазон изменения перетока	Снижение ω , %	Снижение ω^2 , %
Рост от 0 до 0,5 P_{12}^m	7,0	13,4
Рост от 0 до перетока, соответствующего работе с 20 % запасом по мощности	22,4	40,0
Рост от 0 до перетока, соответствующего работе с 8 % запасом по мощности	37,6	61,2
Рост до перетоков, не обеспечиваемых 8 % запасом по мощности	Лавинообразно	Лавинообразно

Можно выделить две области качественно отличающихся режимов работы сети. В первой при изменении перетока P_{12} от нулевого до максимально допустимого с нормируемым «Методическими указаниями по устойчивости энергосистем» 8...20 % запасом по мощности частота ω для конкретной схемы и фиксированных значений параметров X_{12} , P_{n1} , P_{n2} , T_{j1} , T_{j2} , E_1 , E_2 , P_{12}^m меняется не более чем на 22,4...37,6 %. Во второй требуемый запас не обеспечивается и происходит резкое снижение собственной частоты даже при незначительном увеличении перетока.

3. Для трехмашинной схемы в выражении (2) появляется вторая гармоническая составляющая ω_2 .

При утяжелении режима до предельного обе частоты ω_1 , ω_2 снижаются по-разному. Первая частота ω_1 в предельных режимах становится равной нулю, вторая ω_2 – принимает определенное значение. В неустойчивых режимах вместо первой гармоники ω_1 появляется аperiodическая составляющая, второй корень ω_2 продолжает снижаться. Значения частот собственных колебаний ω_1 и ω_2 близки в однородной, равномерно загруженной сети и сильно отличаются в электрически неоднородной схеме при неравномерной загрузке отдельных связей. Чем больше отличаются перетоки по связям, параметры схемы, номинальные мощности генераторов, тем больше различаются значения собственных частот.

4. Для сложной многомашинной схемы в выражении (2) содержится несколько (в общем случае на одну меньше, чем генераторов) гармонических составляющих, которые можно разделить на низко-, средне- и высокочастотные. Низкочастотная часть спектра (порядка до 0,6 Гц для единой электроэнергетической системы (ЕЭС) России) характеризует условия обеспечения статической устойчивости, как и в простейшей схеме. Утяжеление режима до предельного приводит к снижению до нуля одной из его низкочастотных составляющих.

Указанное подтверждается результатами анализа устойчивости традиционным способом и расчетов структурных, динамических свойств межсистемной связи 500 кВ Сибирь – Казахстан – Урал, электропередачи 500 кВ Казахстан – Омск.

Утяжеление планируемого режима путем увеличения перетока по межсистемной связи Сибирь – Казахстан (по XX сечению) приводит к снижению частот собственных колебаний таким образом, что в предельном режиме частота основного тона стано-

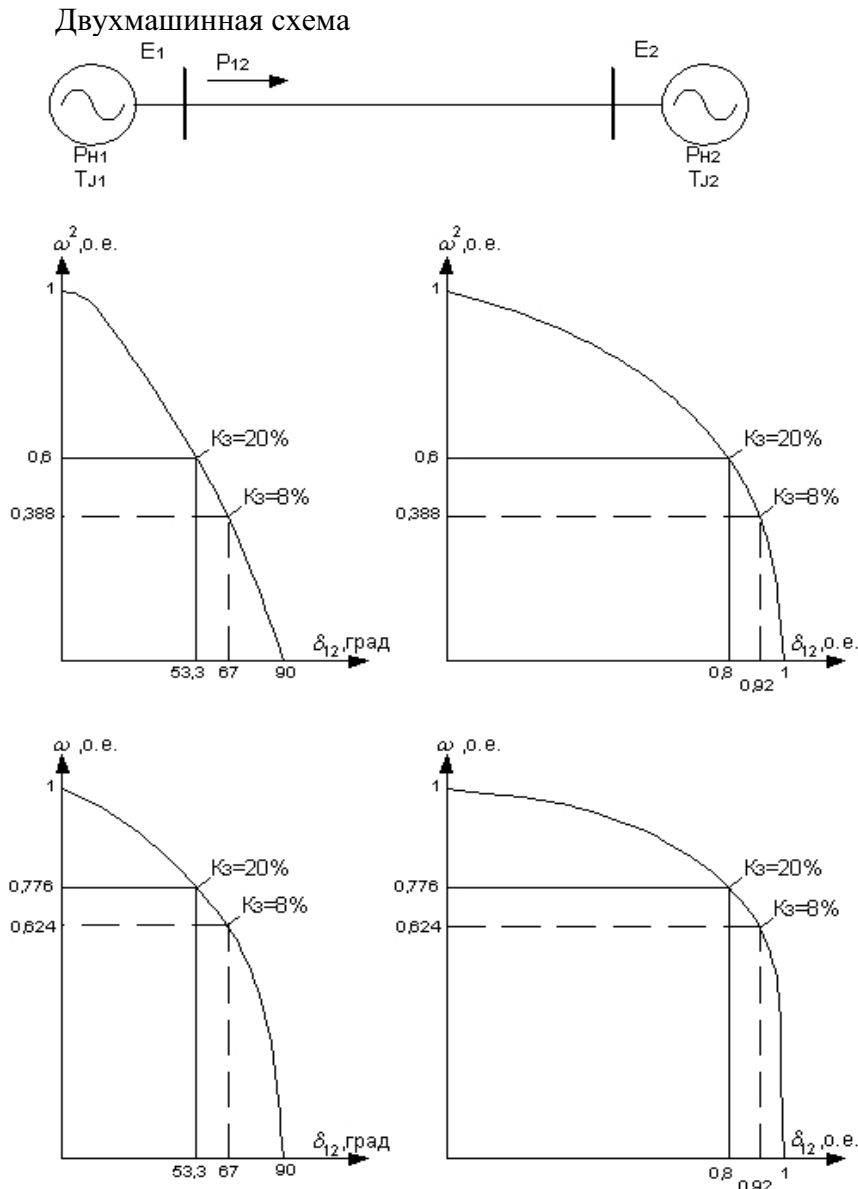


Рис. 1. Влияние режимов работы двухмашинной схемы на частоту собственных колебаний (K_3 – коэффициент запаса по мощности, определяемый «Методическими указаниями по устойчивости энергосистем»)

вится равной нулю, рис. 2, остальные частоты уменьшаются на 16...27 %. Дальнейшее увеличение загрузки XX сечения сопровождается появлением апериодической составляющей и разделением сети на две подсистемы по сечению асинхронного режима.

5. При приближении режима работы сложной многомашинной схемы к предельному по устойчивости за счет увеличения загрузки одного из сечений схемы проявляются определенные закономерности в формировании структур собственных колебаний этой системы, определяющих разбиение генераторов для каждой гармонической составляющей собственных колебаний на синфазно двигающиеся группы. Эти закономерности выражаются в следующем:

- единственное сечение структуры колебаний на самой низкой частоте (основного тона) характеризует работу загружаемого участка сети, по ко-

торому возможно нарушение устойчивости системы с возникновением асинхронного режима;

- на более высоких частотах (на обертонах) могут выделяться слабозагруженные сечения.

6. Амплитуды ($\Delta\delta_1^u, \Delta\delta_2^u$) и характер колебаний роторов генераторов определяются в зависимости от сбросов (набросов) их мощности в первый момент возмущения (например, при коротком замыкании) по выражениям:

- для одномашинной схемы (9):

$$\begin{aligned} \Delta\delta_1 &= \Delta\delta_1^u \sin(\omega t + \varphi) = \\ &= \frac{\omega_0}{\omega^2} \cdot \left(\frac{\Delta P_1}{P_{H1} T_{J1}} \right) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \end{aligned} \quad (9)$$

- для двухмашинной схемы (10), (11):

$$\Delta\delta_1 = -\Delta\delta_1^M \sin(\omega t + \varphi) = -\frac{T_{j2} \cdot P_{n1} \omega_0}{(T_{j2} \cdot P_{n2} + T_{j1} \cdot P_{n1}) \cdot \omega^2} \times \left(\frac{\Delta P_1}{P_{n1} T_{j1}} - \frac{\Delta P_2}{P_{n2} T_{j2}} \right) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (10)$$

$$\Delta\delta_2 = -\Delta\delta_2^M \sin(\omega t + \varphi) = -\frac{T_{j1} \cdot P_{n1} \omega_0}{(T_{j2} \cdot P_{n2} + T_{j1} \cdot P_{n1}) \cdot \omega^2} \times \left(\frac{\Delta P_1}{P_{n1} T_{j1}} - \frac{\Delta P_2}{P_{n2} T_{j2}} \right) \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (11)$$

где ω — частота собственных колебаний, определяемая по выражениям (7), (8) (в рад/с), $\omega_0 = 314$ рад/с, ΔP_1 , ΔP_2 — наброс (сброс) мощности генераторов первой и второй станций при максимальном взаимном угле (в МВт), определяемый как $\Delta P_1 = \Delta P_{K31} \Delta t_{K3} \omega$, $\Delta P_2 = \Delta P_{K32} \Delta t_{K3} \omega$, ΔP_{K31} , ΔP_{K32} — сброс (наброс) электрической мощности генераторов первой и второй станций в первый момент короткого замыкания в МВт, Δt_{K3} — длительность короткого замыкания (секунды).



Рис. 2. Влияние загрузки межсистемной связи Сибирь – Казахстан (XX сечения) P_{xx} и взаимного угла между эквивалентными генераторами Сибири и Казахстана δ на первую гармонику частоты собственных колебаний

7. Гармонический состав электромеханических колебаний существенно зависит от места возмущения. Так, при коротких замыканиях (КЗ) в узле 1 для трехмашинной схемы и режима на рис. 3 проявляется только одна частота ω_1 , на которой генераторы 2, 3 идут синфазно и противофазно генератору 1. В то же время при КЗ в узле 2 проявляются

обе формы колебаний ω_1 и ω_2 , что приводит к колебаниям генераторов 1, 2, 3 на обеих частотах. Это означает, что в общем случае рассматриваемая на рис. 3 схема — трехмашинная, но при некоторых условиях (в определенных режимах и для определенных движений) она может упрощаться и учитываться как двухмашинная.

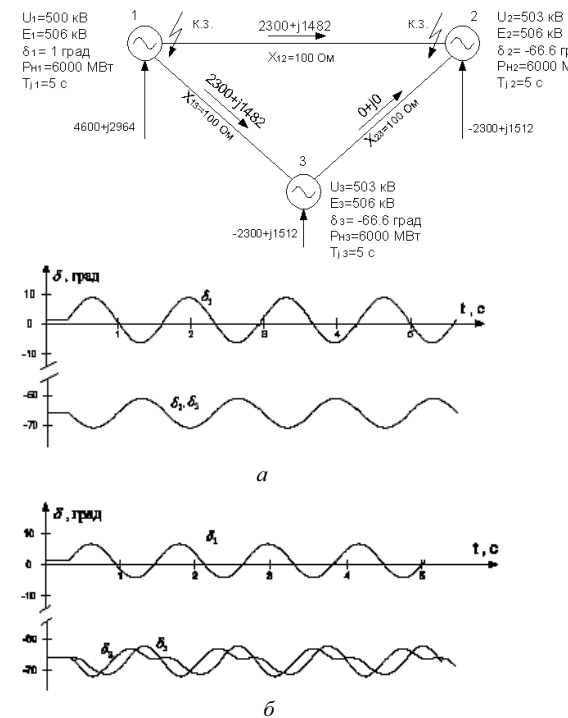


Рис. 3. Реакция системы на возмущения при КЗ в узле: а) 1; б) 2

Выводы

1. Энергообъединение, несмотря на свои огромные размеры и сложный характер протекающих в ней переходных процессов, обладает динамическими свойствами, которые определяют его поведение (реакцию) при возмущениях и электромеханических колебаниях. Характер электромеханических процессов зависит от исходного режима работы системы, от величин возмущений, от способа регулирования возбуждения, настройки автоматических регуляторов возбуждения и проявляется в виде колебательных или аperiodических движений, колебательных процессов в форме затухающих колебаний, автоколебаний или расходящихся колебаний, сопровождающихся нарушением устойчивости в виде самораскачивания.
2. Анализ одно-, двух-, трех- и многомашинных схем показал возможность применения в качестве показателей для оценки удаленности режима от предельного по устойчивости частот собственных колебаний. Показано, что влияние режима работы выражается в том, что с приближением режима к предельному снижаются частоты и увеличиваются амплитуды собственных

электромеханических колебаний электроэнергетической системы, а при возмущениях вместо устойчивых затухающих колебаний может наблюдаться процесс нарушения устойчивости. Каждой точке режима многомерной области устойчивости соответствует определенный спектр частот собственных колебаний. С изме-

нением режима этот спектр меняется. Он в полной мере отражает состояние всего объединения в целом, т. е. является обобщенным его показателем. Снижение одной из частот до нуля говорит об утяжелении режима до предельного, появление аperiodической составляющей указывает на неустойчивость режима.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. — М.: Энергоатомиздат, 1994. — 319 с.
2. Лизалек Н.Н., Бушуев В.В., Колотилов Ю.А. Динамические свойства протяженных энергообъединений // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1988. — № 6. — С. 3–16.
3. Баринев В.А., Воробей Н.И. Влияние динамических свойств на принципы формирования основной электрической сети Единой электроэнергетической системы СССР // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. — 1990. — № 6. — С. 25–28.
4. Литкенс И.В., Филиппова Н.Г. Анализ и улучшение динамических свойств объединенных энергосистем // Электричество. — 1991. — № 12. — С. 1–9.
5. Abdalla O.H., Hasan S.A., Twig N.T. Coordinated stabilization of a multimachine power system // IEEE Trans. on PAS. — 1984. — V. 103. — № 3. — P. 483–494.
6. Груздев И.А., Масленников В.А., Устинов С.М. Исследование собственных динамических свойств протяженных электроэнергетических объединений // Известия АН СССР. Энергетика. — 1993. — № 1. — С. 102–114.
7. Литкенс И.В., Пуго В.И. Колебательные свойства электрических систем. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 228 с.
8. Разработка способа определения тяжести режима на основании анализа частот собственных колебаний / Под ред. С.В. Шиловского. — Новосибирск: СИ ЭСП, 1998. — 75 с.
9. Шиловский С.В. Выбор значимых факторов и способа противоаварийного управления для организации и совершенствования автоматики предотвращения нарушения устойчивости АПНУ // Энергетика России в XXI веке: развитие, функционирование, управление: Сб. докл. Всероссийской конф. — Иркутск: ИСЭМ, 2005. — С. 167–173.

Поступила 30.10.2007 г.

УДК 621.311.002

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ХАРАКТЕРИЗУЮЩИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПОТЕРИ УСТОЙЧИВОСТИ

С.В. Шиловский

Институт автоматизации энергетических систем, г. Новосибирск

E-mail: shi@iaes.ru

Рассматривается энергия колебаний в качестве показателя для оценки устойчивости. Обосновывается информативность и возможность использования энергии колебаний для решения задачи определения опасных по устойчивости сечений схемы. Предлагаются числовые оценки, позволяющие получить обобщенное представление о системе, определить, насколько конкретный стационарный режим удален от предела по устойчивости, по каким участкам сети возможно нарушение устойчивости. Описывается методика определения опасных по устойчивости сечений объединенной электроэнергетической системы.

Введение

Изучение условий обеспечения устойчивости объединения представляется возможным проводить с использованием энергетических показателей, характеризующих возможности потери устойчивости системы в результате превышения обменных перетоков по связям объединения при электро-механических колебаниях их предельных значений. Такие исследования устойчивости целесообразно выполнять путем оценки и анализа энергии колебаний, определяющей обмен энергией и мощностью между различными частями системы (подсистемами) и энергетические спектры электро-механических колебаний, для решения вопросов, связанных с выделением опасных с точки зрения устойчиво-

сти, наиболее загруженных участков сети, определения возможных последствий от развития аварий, обоснования выбора точек замера потоков активной мощности, определения удаленности режима от предельного, формирования моделей сети.

Энергия колебаний, как показатель для оценки устойчивости

Энергии колебаний k -й составляющей i -ой синхронной машины ΔE_{ik} в линеаризованной модели электроэнергетической системы (ЭЭС) согласно [1] определяется как:

$$\Delta E_{ik} = 0,5\omega_k^2 J_i (\Delta \delta_{ik})^2 = 0,5\omega_k^2 \frac{P_{ni} T_{ji}}{\omega_0} (\Delta \delta_{ik})^2,$$