

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 апериодической 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. Баринов В.А., Воропай 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. — Р. 483–494.
6. Груздев И.А., Масленников В.А., Устинов С.М. Исследование собственных динамических свойств протяженных электро-энергетических 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 электромеханических 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:

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

где ΔE_{ik} и $\Delta \delta_{ik}$ — энергия и амплитуды колебаний i генератора на k частоте, J_i — момент инерции i генератора.

Возможность использования энергии колебаний для решения поставленной задачи определения опасных по устойчивости сечений схемы основывается на следующих физических представлениях об энергии колебаний и колебательных процессах в энергосистемах [2–8]:

1. Возмущение от места повреждения распространяется по системе. При этом энергия возмущения распределяется между отдельными спектральными составляющими и вызывает колебания между отдельными группами генераторов. Размах колебаний растет при увеличении интенсивности возмущения. В опасных для устойчивости аварийных ситуациях находится слабое сечение схемы, которое из-за ограниченной пропускной способности не может обеспечить передачу обменного перетока и по которому происходит нарушение устойчивости системы.
2. Место нарушения устойчивости зависит от распределения энергии между отдельными гармоническими составляющими, от структуры собственных колебаний, т. е. от структуры разбиения на подсистемы, которая служит одной из важнейших динамических характеристик системы, жестко связанной с частотой собственных колебаний. Оно меняется в зависимости от местоположения возмущающего воздействия и режима работы системы в результате перераспределения энергии колебаний между отдельными составляющими колебаний и изменения структуры колебаний на различных частотах.

Введение в [1] понятия энергии колебаний позволяет проранжировать все движения по энергетическим показателям, определить значимость каждого из них в общем электромеханическом процессе и оценить условия, которые не приводят к возникновению колебаний на определенных частотах. Смысл и полезность понятия энергии колебаний состоит прежде всего в том, что энергетический спектр колебаний, возбужденных при любом возмущающем воздействии, может быть описан взвешанной суммой значений, или, как говорят, энергия колебаний может быть разложена по ее составляющим значениям ΔE_k . Энергию колебаний, возбужденных при любом возмущении, можно представить спектральным разложением:

$$\Delta E = \sum_k \Delta E_k,$$

где ΔE_k — энергия k -ой составляющей колебаний, ΔE — энергия всех составляющих колебаний.

Весовые коэффициенты ε_k можно интерпретировать как энергетическую значимость возбуждения отдельных составляющих колебаний для данного возмущения, определяемую как:

$$\varepsilon_k = \Delta E_k / \Delta E. \quad (1)$$

Методика определения опасных по устойчивости сечений объединенной электроэнергетической системы

Анализ системных аварий показывает, что число опасных сечений и динамических подсистем, которые выделяются в реальной аварийной ситуации, значительно меньше определенных согласно [1] всеми волновыми структурами по синфазности и противофазности колебаний на различных частотах. Асинхронный ход наиболее часто возникает по одному из сечений схемы, гораздо реже одновременно по двум сечениям, еще реже по трем — пяти. Указанное обстоятельство определяет необходимость и возможность упрощения структурного описания объединенной электроэнергетической системы (волновой структуры).

По результатам проведенных исследований с расчетом энергии колебаний для определения опасных по устойчивости сечений, по которым возможно нарушение устойчивости системы, и для оценки удаленности конкретного стационарного режима от предела по устойчивости предложены, проанализированы и теоретически обоснованы следующие числовые показатели:

- числовые характеристики распределения энергии колебаний между гармоническими составляющими;
- критическая (максимально-допустимая) энергия колебаний, при которой происходит нарушение устойчивости системы;
- степень неоднородности системы.

Оценка энергетической значимости отдельных составляющих колебаний ε_k по выражению (1) и отбрасывание малозначимых, невозбуждаемых составляющих гармонического спектра позволяет выделить высокоэнергетичные гармонические составляющие и соответствующие этим составляющим сечения схемы, определяемые структурой собственных колебаний системы на различных частотах.

Возникающие в системе колебания приводят к превышению допустимых перетоков и нарушению устойчивости системы по наиболее слабым, наиболее загруженным участкам сети, препятствующим обмену мощности при электромеханических колебаниях из-за их ограниченной пропускной способности, соизмеримой с размахом возникающих по ним колебаний, или из-за работы с перетоками мощности, близкими к допустимым уже в исходном режиме. В то же время, остальные связи остаются слабо загруженными и могут обеспечить обмен мощности при возникновении возмущений.

Энергия колебаний линеаризованной системы и ее составляющие для каждого собственного колебательного движения имеют простую геометрическую интерпретацию, состоящую в их пропорциональной связи с дифференциалами площадей ускорения и торможения, вычисленными по характеристикам мощности $P=f(\delta)$.

Критическая величина энергии колебаний, передача которой может быть обеспечена по рассматриваемой связи (сечению), ограничивается ее площадкой торможения, определяемой как:

$$\Delta E_{ijk} = S_{ijk}/100\pi = \frac{1}{100\pi} \int_{\delta_{ij}^{исх.}}^{\delta_{ij}^{кр.}} [P_{ij}^m \sin(\delta_{ij}) - P_{ij}^{исх.}] d\delta_{ij}, \quad (2)$$

где P_{ij}^m – величина структурной мощности по связи между генераторами i и j (по сечению между подсистемами i и j), $P_{ij}^{исх.}$ – взаимный обменный переток в исходном стационарном режиме по связи между генераторами i и j (по сечению между подсистемами i и j), δ_{ij} – взаимный угол роторов генераторов i и j (роторов генераторов подсистем i и j), $\delta_{ij}^{исх.}$ и $\delta_{ij}^{кр.}$ – исходный и критический взаимный угол роторов генераторов i и j (роторов генераторов подсистем i и j).

Степень неоднородности схемы численно может быть выражена соотношениями обменных и структурных мощностей между генераторами системы, где обменные мощности определяются как перетоки мощности между узлами системы в исходном стационарном режиме, структурные мощности – как элементы матрицы собственных и взаимных мощностей:

$$|P_{ij}^m|, \quad i, j=1, \dots, n, \quad (3)$$

где $P_{ij}^m = E_i E_j Y_{ij}$; E_i, E_j – ЭДС генераторов i, j , Y_{ij} – взаимная проводимость между ними, n – число генераторных узлов.

Получение и использование числовых оценок показателей энергетической значимости, критической энергии колебаний, степени неоднородности схемы намечается по методике определения опасных по устойчивости сечений объединенной электроэнергетической системы (ОЭС) следующим образом:

- оценивается энергетическая значимость отдельных составляющих колебаний по выражению (1), отбрасываются малозначимые, невозбуждаемые составляющие гармонического спектра и выделяются энергетически насыщенные (высокоэнергетичные) формы свободного колебательного движения и соответствующие этим формам сечения схемы, определяющие разбиение на группы синфазно колеблющихся (двигающихся) роторов генераторов;
- формируется матрица критических (максимально-допустимых) значений энергии колебаний, отнесенных к $S_{ij}^0/100\pi$, по связям между выше выделенными подсистемами вида:

$$|S_{IJ}/100\pi : S_{IJ}^0/100\pi|, \quad I, J=1, \dots, m$$

и критических значений энергии колебаний, отнесенных к $S_I^0/100\pi$, по сечениям схемы вида:

$$|S_I/100\pi : S_I^0/100\pi| = |S_I : S_I^0| = |S_I S_{IJ} : S_I S_I^0|, \quad I, J=1, \dots, m,$$

где значения элементов S_{IJ} , S_I^0 определяются по выражению (2) для текущего режима и для режима с нулевыми перетоками по связям и сечениям схемы.

- преобразуется матрица собственных и взаимных мощностей генераторов (3) до вида матрицы вза-

имосвязи выше выделенных сечений схемы путем объединения всех генераторов, входящих в одну подсистему, и суммирования структурных мощностей параллельных связей между подсистемами:

$$|P_{ij}^m| \xrightarrow{\Sigma i, j} |W_{IJ}|, \quad i, j=1, \dots, n, \quad I, J=1, \dots, m,$$

где: $\Sigma i, j$ – суммирование структурных мощностей параллельных связей, i, j – номера генераторных узлов системы, n – число генераторных узлов в объединении, I, J – номера подсистем обобщенной волновой структуры, m – число выделившихся подсистем энергонасыщенных форм колебательных движений.

- формируется матрица значений коэффициентов запаса по связям между подсистемами, определяющая степень неоднородности схемы по отношению структурного максимума к стационарному перетоку $P_{ij}^{исх.}$, как:

$$|K_{IJ}| = |W_{IJ}/P_{ij}^{исх.}|, \quad I, J=1, \dots, m$$

и по сечениям схемы вида:

$$|K_I| = \left| \sum_j W_{IJ} / \sum_j P_{IJ}^{исх.} \right|, \quad I, J=1, \dots, m.$$

Наиболее опасные с точки зрения устойчивости участки сети определяются по минимальным значениям S_{IJ}/S_{IJ}^0 , S_I/S_I^0 , K_{IJ} , K_I . Группы генераторов, связи между которыми слабо загружены, имеют большой запас по S/S^0 , K и могут объединяться в одну подсистему.

Методика определения опасных по устойчивости сечений ОЭС включает этапы и промежуточные цели, которые можно сформулировать следующим образом:

1. Анализ возможных режимов работы объединения и выбор из них представительных для решения задачи определения опасных по устойчивости, наиболее загруженных сечений ОЭС.
2. Формирование общего представления о колебательных движениях. Выделение синфазно движущихся групп генераторов (подсистем) и связывающих их сечений. Определение волновых структур для различных гармонических составляющих спектра электромеханических колебаний.
3. Выбор расчетных возмущений. Оценка распределения энергии колебаний между различными гармоническими составляющими для расчетного набора возмущений.
4. Отбор доминирующих, энергетически насыщенных (обладающих максимальной энергией) движений.
5. Выделение сечений схемы для энергонасыщенных форм колебательных движений.
6. Формирование матрицы взаимосвязи выделенных по п. 5 сечений схемы.
7. Определение коэффициентов запаса и критической энергии колебаний для выделенных по п. 5 сечений схемы. Выделение наиболее опасных, с точки зрения устойчивости, наиболее загруженных связей и сечений схемы.

Выбор представительных режимов на первом этапе объясняется требованием получения наиболее полного структурного отображения ОЭС, соответствующего выделению всех опасных сечений схемы. Сформировать полное представление об объединении на основании одного режима не представляется возможным, так как с его изменением состав выделившихся сечений и подсистем может меняться. В то же время, рассмотреть все возможные режимы работы ОЭС не представляется возможным ввиду их огромного числа. Поэтому целесообразно исследовать наиболее характерные, представительные планируемые и утяжеленные режимы, соответствующие наибольшей загрузке отдельных связей системы.

На пятом этапе формируется отображение главной структуры объединения для полной схемы как совокупность подсистем, внутренние движения которых не сказываются существенным образом на условиях обеспечения устойчивости всей системы в целом. При этом в схеме могут сохраняться и отдельные, физически существующие элементы исследуемой системы, поведение которых может иметь важное значение для рассматриваемых процессов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бушуев В.В., Лизалек Н.Н., Новиков Н.Л. Динамические свойства энергообъединений. – М.: Энергоатомиздат, 1994. – 319 с.
2. Шиловский С.В., Лизалек Н.Н. Энергетические спектры электромеханических колебаний // Устойчивость и надежность электроэнергетических систем: Сб. докл. Междунар. научно-техн. конф. – СПб.: ПЭИПК, 2005. – С. 129–135.
3. Богатырев Л.Л., Зубарев В.В., Паздерин А.В. Алгоритмы управления аварийными режимами электроэнергетических систем для повышения надежности их функционирования // Надежность при управлении развитием и функционированием электроэнергетических систем. Сб. науч. тр. Сибирского энергетического института СО АН СССР. – Иркутск: СЭИ, 1989. – С. 176–183.
4. Левит Л.М., Горбунова Л.М., Рабинович Р.С. и др. О реакции протяженной энергосистемы на небалансы активной мощности // Электричество. – 1982. – № 1. – С. 20–23.

Выводы

1. Энергия колебаний может быть использована для оценки потери устойчивости системы в результате нарушения энергетического баланса, вызванного превышением обменных перетоков по связям ОЭС предельных значений.
2. Место нарушения устойчивости зависит от распределения энергии между отдельными гармоническими составляющими и от разбиения для каждой составляющей на синфазно двигающиеся группы генераторов. При вариации местоположения возмущающего воздействия и режима работы системы состав электромеханических движений меняется. Меняется также распределение энергий между отдельными составляющими колебаний.
3. Получение обобщенного представления о системе, определение, насколько конкретный стационарный режим удален от предела по устойчивости, по каким участкам сети возможно нарушение устойчивости, а также нахождение структур движения в объединении при нарушении устойчивости (доминирующих динамических структур неустойчивости) представляется возможным на основании их числовых оценок.
5. Андреюк В.А., Гусаковская М.А., Остапенко И.А. Исследование переходных процессов и устойчивости объединенной энергосистемы при аварийных дефицитах активной мощности // Способы повышения устойчивости и надежности объединенных энергосистем. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – С. 15–22.
6. Бушуев В.В. Динамические свойства электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 319 с.
7. Веников В.А. Системный подход к проблемам электроэнергетических систем // Электричество. – 1985. – № 6. – С. 1–4.
8. Агарков О.А., Воропай Н.И., Ефимов Д.Н., Некряченко О.Г. Комплексный анализ динамических свойств электроэнергетических систем // Известия АН. Энергетика. – 1992. – № 4. – С. 24–29.

Поступила 30.10.2007 г.