

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ УПРОЩЕННОМ ПРЕДСТАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

В статье рассмотрены переходные процессы для упрощенной электроэнергетической системы при различных видах коротких замыканий.

The article deals with the transients for a simplified power system for various types of short circuits.

При анализе динамической устойчивости энергосистемы приходится рассматривать большой спектр переходных процессов. Такое многообразие обусловлено вероятностью возникновения возмущений в любых элементах энергосистемы и различной степенью их интенсивности: коротких замыканий – от однофазного до трехфазного, которые могут возникать и на основных связях высшего класса напряжения, и в распределительных сетях, вблизи узловых подстанций, и в середине линий; аварийных отключений генераторов, приводящих к появлению различных по величине дефицитов мощности, и т.д. Для полного анализа динамической устойчивости энергосистемы и выбора противоаварийных мероприятий следовало бы выполнять расчеты переходных процессов при всех возмущениях во всех пунктах энергосистемы, что заведомо нереально. Однако на основании результатов расчетов наиболее характерных случаев, анализа аварийных ситуаций в реальных условиях и понимания физической сущности переходных процессов возможно ограничение числа рассматриваемых возмущений и точек их приложения. Это позволяет исключить из рассмотрения те возмущения, которые заведомо не приводят к нарушению устойчивости генераторов и двигателей и не требуют специальных противоаварийных мероприятий [1].

В то же время в некоторых случаях значительную опасность могут представлять такие возмущения, которые не входят в список расчетных, но в каких-то конкретных условиях имеют достаточно большую вероятность. Так, например, в некоторых избыточных районах, связанных с энергосистемой сильно загруженными линиями электропередачи, приходится учитывать возможность внезапных отключений крупных потребителей. Такие сбросы нагрузки приводят к опасным по статической и динамической устойчивости набросам мощности на связь с энергосистемой.

Умение на основании ограниченного числа расчетов правильно представлять возможные последствия реальных возмущений необходимо также и при рассмотрении тяжелых аварий. В этих случаях важно правильно судить об изменениях режима работы энергосистемы после того промежутка времени, для которого обычно выполняются расчеты (от 2 – 3 до 10 с), и о факторах, влияние которых может изменить протекание аварийного процесса. Известно, что наиболее тяжелые аварии обусловлены не самим исходным возмущением, а цепочкой вызванных им событий. Такие аварии называют каскадными; их развитие может быть связано с отказами выключателей, устройств защиты и автоматики. Иногда развитие аварий – результат наложения независимых событий. Каждый такой случай маловероятен; в целом же они разнообразны и трудно предсказуемы.

Иногда развитие аварии не случайное, а вполне закономерное следствие возмущений, и необходимо такие последствия предвидеть. К ним относятся: дополнительные нарушения устойчивости при возникновении асинхронного режима, отключения потребителей из-за глубоких снижений напряжения, опасные понижения или повышения напряжения на линиях электропередачи из-за значительных изменений перетоков мощности и т.п. Рассчитать такие последствия возмущений можно, если комбинировать расчеты промежуточных установившихся режимов с расчетами переходных процессов для отдельных этапов развития аварии. Главная трудность анализа в этих случаях состоит в том, чтобы правильно наметить сценарии возможных путей развития аварии.

Таким образом, расчеты переходных процессов преследуют не только чисто утилитарные цели получения оценок динамической устойчивости энергосистемы для заданной группы исходных режимов и расчетных возмущений. Они дают исходный материал для всестороннего осмысления процессов, который необходим при выборе эффективных противоаварийных мероприятий.

Все многообразие факторов, влияющих на динамическую устойчивость энергосистемы, можно условно разделить на две группы. Одна группа определяет динамическую устойчивость собственно генераторов. Другая группа факторов связана с теми переходными процессами в узлах нагрузки, которые могут инициироваться возмущениями в энергосистеме и в свою очередь оказать существенное влияние на устойчивость генераторов.

Если две концентрированные части энергосистемы соединены связью, пропускная способность которой мала (рис. 1), то переходные процессы, вызывающие нарушение динамической устойчивости по этой связи, зависят от параметров связи, суммарной мощности генераторов и нагрузок в концентрированных частях энергосистемы, но мало зависят от конкретной схемы этих частей и распределения мощностей между генераторами в каждой из них.

В таких случаях при качественном анализе каждую из частей энергосистемы можно представлять одним эквивалентным генератором и одной нагрузкой (рис. 2). Все особенности переходных процессов в таких двухмашинных схемах хорошо изучены [2, 3] и понимание этих процессов позволяет ориентироваться в других случаях, более сложных и более важных с эксплуатационной точки зрения. В то же время рассматриваемый здесь случай одной слабой связи между частями энергосистемы имеет и самостоятельное значение, так как подобные схемы встречаются на практике.

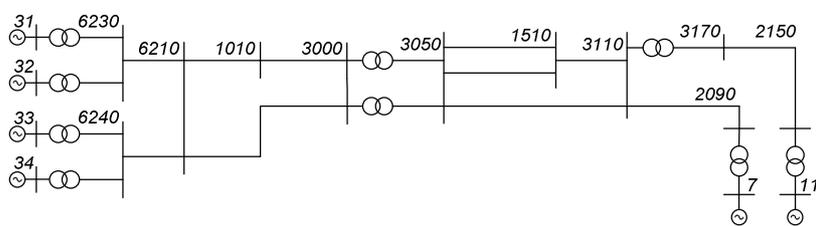


Рис. 1. Упрощенное представление двух концентрированных частей энергосистемы со связью между ними.

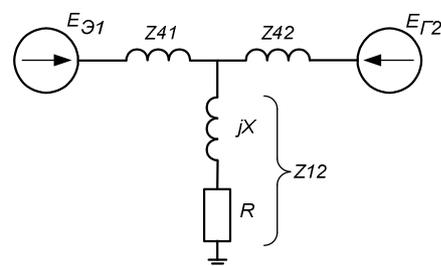


Рис.2. Преобразованная схема замещения.

Можно выделить два основных варианта двухмашинной схемы: во-первых, схему, в которой электростанция с небольшой местной нагрузкой связана достаточно длинной линией электропередачи с концентрированной энергосистемой, и, во-вторых, схему со слабой связью между двумя достаточно большими концентрированными частями энергосистемы. Первый вариант отличается от второго тем, что при возмущениях на связи генераторов с энергосистемой большую роль играют не только электромеханические, но и электромагнитные переходные процессы в генераторах.

При возникновении трехфазного КЗ во внешней сети резко увеличиваются амплитуды переменного тока во всех трех фазах статора.

Изменение тока статора вызывает по закону электромагнитной индукции появление свободных токов в роторе. В обмотке возбуждения и демпферных контурах, как и в обмотках статора, появляются по две составляющие токов. Благодаря тому, что ротор в момент возникновения КЗ вращается с синхронной частотой, а статор, естественно, неподвижен, апериодической составляющей тока статора отвечают периодические составляющие токов ротора, имеющие частоту 50 Гц, а периодической составляющей тока статора отвечают апериодические токи ротора. Изменения тока в обмотке возбуждения иллюстрируются рис. 3, а (сплошная линия); здесь показан случай, когда регулирование возбуждения отсутствует. Действие АРВ вызывает при КЗ форсировку возбуждения; при этом установившееся значение тока i_f выше исходного (штриховая линия на рис. 3, б), соответственно увеличиваются токи в фазах статора. При отключении КЗ появляются свободные токи обратных знаков; ток i_f в момент отключения КЗ резко уменьшается. Все изменения тока в обмотке возбуждения и в демпферном контуре по продольной оси ротора (т.е. по той же оси, по которой расположена обмотка возбуждения) отражаются на значениях ЭДС E_q .

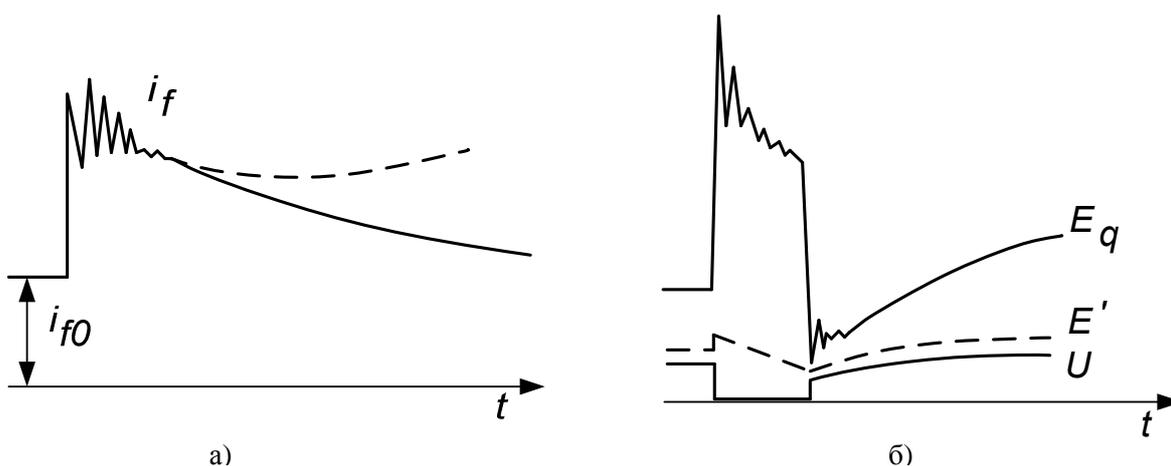


Рис. 3. Трехфазное КЗ вблизи шин генератора.

Все вышесказанное приводит к изменению передаваемых мощностей.

Нарушение баланса активных мощностей в одной из частей энергосистемы, например, отключение генератора, приводит к процессу на слабой связи, аналогичному простому переходу (рис. 4). В этом случае угловая характеристика мощности остается неизменной, но изменяется установившееся значение перетока по связи.

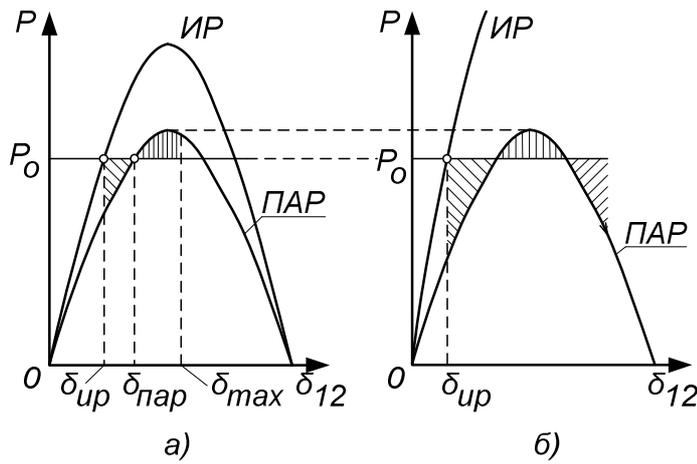


Рис. 4. Динамическая устойчивость при «простом переходе».

Характерным параметром переходного процесса является период собственных колебаний генераторов T_{cob} после возмущения (когда динамическая устойчивость не нарушилась). Для схемы, показанной на рис. 2, решая характеристическое уравнение и пренебрегая затуханием, можно получить, что период T_{cob}

пропорционален $\sqrt{\frac{\tau_j}{P_{max} \cos \delta_0}}$.

Если постоянная инерции генераторов выражена в секундах, то

$$T_{cob} = 0,354 \sqrt{\frac{\tau_j S_{\Sigma \text{ г.ном.}}}{P_{ПАРmax} \cos \delta_{ПАР}}},$$

где $\frac{P_{ПАРmax}}{S_{\Sigma \text{ г.ном.}}}$ – предел передаваемой мощности по связи в послеаварийном режиме в долях суммарной кажущейся мощности генераторов; $\delta_{ПАР}$ – установившееся значение угла генераторов относительно ЭДС приемной системы.

По этой формуле при $\tau_j = 10 \text{ с}$:

$\frac{P_{ПАРmax}}{S_{\Sigma \text{ г.ном.}}}$	1,5	1,5	0,5	0,5	0,05	0,05
$\delta_{ПАР}$, град	30	60	30	60	30	60
T_{cob} , с	0,98	1,29	1,7	2,24	5,38	7,08

Таким образом, при слабой связи генераторов с энергосистемой периоды собственных колебаний велики; при больших T_{cob} переходный процесс из-за наличия демпфирования может восприниматься почти как аperiodический.

1. Малкин, И.Г. Теория устойчивости движения. – М.: Наука, 1966.
2. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979.
3. Веников, В.А. О возможности единого подхода к статической и динамической устойчивости электрических систем // Электричество. – 1976. – № 7. – С. 72-73.