

Т.А. Джунуев, А.Н. Козлов

ВЛИЯНИЕ НАГРУЗКИ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОГРАНИЧЕННОЙ МОЩНОСТИ

Рассмотрены вопросы влияния нагрузки и генераторов электростанций на устойчивость электроэнергетической системы ограниченной мощности, сопровождающегося глубокими изменениями частоты.

The questions of the effect of load and generator power on the stability of power system of limited capacity, accompanied by profound changes in frequency.

Возмущения в энергосистеме в большинстве случаев заметно влияют на работу потребителей и могут вызвать большие и резкие изменения активной и реактивной нагрузок. Это, естественно, влияет на изменение углов δ и устойчивость генераторов. Поэтому взаимное влияние генераторов и нагрузок часто оказывается основным фактором, определяющим весь ход процесса и возможность развития аварии. Этот фактор приходится иметь в виду, в частности, при выборе точек приложения расчетных возмущений. Например, КЗ внутри концентрированной энергосистемы само по себе может не создавать угрозы нарушения динамической устойчивости генераторов, так как при малых взаимных сопротивлениях пределы устойчивости велики. Но это же КЗ может стать причиной нарушения устойчивости энергосистемы, если нарушится устойчивость большого числа двигателей или отключится большая часть потребителей [1].

Снижение напряжения в узле нагрузки приводит к торможению двигателей, резкому увеличению потребляемой ими реактивной мощности и дополнительному снижению напряжения. Последнее может вызвать нарушение устойчивости других, еще работающих двигателей. Это – лавина напряжения. Она характеризуется глубоким снижением напряжения, вначале медленным, потом все более быстрым. Если в нагрузке есть синхронные двигатели, то в напряжении и токе

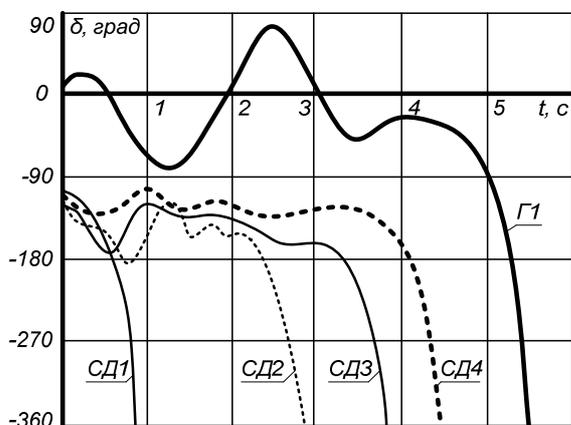


Рис. 1. Нарушение динамической устойчивости энергосистемы со значительной синхронной нагрузкой.

нагрузки появляются пульсации, вызванные асинхронным ходом возбужденных синхронных двигателей.

Исходная причина нарушения динамической устойчивости двигателей для диспетчера энергосистемы может оказаться совершенно незаметной; ею может быть, например, КЗ в сети 6 – 10 кВ промышленного предприятия. Но последствия такого возмущения – наброс реактивной нагрузки – иногда приводит к значительному снижению напряжения даже в сети 220 – 500 кВ. Лавинообразный процесс нарушения устойчивости синхронных двигателей, вызванный КЗ в распределительной сети, показан на рис. 1. При начальном возмущении выпали из синхронизма двигатели на первой подстанции СД1, что привело к снижению напряжения и последовательному

нарушению устойчивости синхронных двигателей на других подстанциях – СД2, СД3, СД4. Асинхронный режим большого числа двигателей вызвал значительное снижение напряжения на линии электропередачи 500 кВ и нарушение синхронизма генераторов ближайшей электростанции (Г1 на рис. 1). Поскольку нагрузка данного района значительно превышала генерацию, нарушение устойчивости генераторов сопровождалось не повышением, а понижением частоты (уменьшением угла δ).

Иногда нарушение устойчивости нагрузки совершенно меняет вид переходных процессов, особенно в дефицитных районах энергосистем. Покажем, что потеря связи такого района с энергосистемой может приводить (в зависимости от запаса устойчивости нагрузки, значения дефицита активной мощности и имеющихся резервов реактивной мощности) к переходным процессам двух типов: в одних условиях процесс может сопровождаться понижением частоты генераторов, а в других, наоборот, – ее повышением.

Рассмотрим эти процессы для дефицитного района, содержащего одну электростанцию, загруженную до номинальных значений активной и реактивной мощности, и нагрузку, обычную по своему составу, сконцентрированную вблизи шин этой электростанции. Значение дефицита мощности

$$d = \frac{P_n - P_z}{P_z} \times 100\%$$

будем варьировать от 10 до 90%. На рис. 2, а приведены результаты расчетов для разных значений d в простейшем случае – при отключении связи данного района с энергосистемой без КЗ или при удаленном КЗ; действие всех средств ПА не учитывается.

При умеренных значениях дефицита мощности отключение связи с энергосистемой и вызванный этим наброс мощности на генераторы приводит к снижению частоты. Но если дефицит мощности, рассчитанный по нормальному режиму, превосходит некоторое критическое значение (в данном случае $d_{кр.} \approx 65\%$), то характер процесса резко меняется. После отключения связи напряжение значительно понижается, двигатели опрокидываются и тормозятся. Это приводит к дополнительному снижению напряжения (см. рис. 2,а) и к быстрому уменьшению потребляемой активной мощности; торможение генераторов сменяется их ускорением. Например, $d \approx 80\%$ при напряжении после отключения связи уменьшается до $0,662 U_{ном.}$, а через 0,5 с, когда скольжение двигателей превышает 20%, – до $0,235 U_{ном.}$ Соответственно нагрузка, равная в исходном режиме $5 P_{z.ном.}$ (переток из энергосистемы составляет $4 P_{z.ном.}$), после отключения связи уменьшается до $0,219 P_{z.ном.}$, а через 0,5 с – до $0,29 P_{z.ном.}$

Если отключению связи предшествует близкое КЗ, то двигатели тормозятся быстрее и лавина напряжения, приводящая к сбросу активной нагрузки, возникает при меньших дефицитах мощности. Когда связь с энергосистемой не разрывается полностью, а лишь ослабляется из-за отключения линии с большей пропускной способностью, также провоцируется лавина напряжения, если по ослабленной связи возникает асинхронный режим [2]. При этом реактивная мощность потребляется не только нагрузкой, но и линией связи с энергосистемой, и напряжение в дефицитном районе снижается сильнее, чем при полном разрыве связи. В таких ситуациях в некоторых схемах лавина напряжения получалась уже при $d \geq 65\%$.

Критическое значение $d_{кр.}$ зависит от параметров нагрузки. В частности, уменьшение механической постоянной инерции двигателей приводит к снижению $d_{кр.}$, так как чем быстрее выбег двигателей, тем в меньшей мере успевает проявиться действие форсировки возбуждения генераторов. Наличие синхронных компенсаторов и самоотключение части нагрузки увеличивают значение $d_{кр.}$. Поэтому в разных возможных случаях $d_{кр.}$ может составлять от 30 до 90%.

В больших дефицитных районах с достаточно протяженными распределительными сетями и несколькими электростанциями могут иметь место процессы тех же двух типов. Однако при больших дефицитах мощности из-за резкого изменения потокораспределения после обрыва связи и глубокого снижения напряжения возможны нарушения параллельной работы генераторов разных электростанций и в дефицитном районе энергосистемы может образоваться несколько асинхронно работающих частей. Иначе говоря, в разных частях района критические значения $d_{кр}$ могут оказаться различными. Такой случай показан на рис. 2,б; в этом расчете для крупного района энергосистемы с общим дефицитом мощности $d = 75\%$ рассматривалось отключение основной питающей линии 220 кВ при КЗ, удаленном от приемного конца линии, с успешным ТАПВ, $t_k = 0,12$ с, $\Delta t_{АПВ} = 2$ с. Кроме ВЛ 220 кВ, имеются две линии связи с энергосистемой напряжением 110 кВ. В данном случае при отсутствии ПА нарушение устойчивости и торможение асинхронных и синхронных двигателей привели к сбросу активной нагрузки, причем генераторы одной из электростанций ($G1$) остались в синхронизме с энергосистемой, а другой ($G2$) перешли в асинхронный режим с частотой, большей номинальной. Напряжения в распределительных сетях 35 – 110 кВ снизились более чем на 50%. Для этого района при дефиците мощности $d = 75\%$ в случае успешного ТАПВ ВЛ 220 кВ требуемый для сохранения устойчивости параллельной работы объем отключаемой нагрузки составляет 25 – 30% суммарной нагрузки.

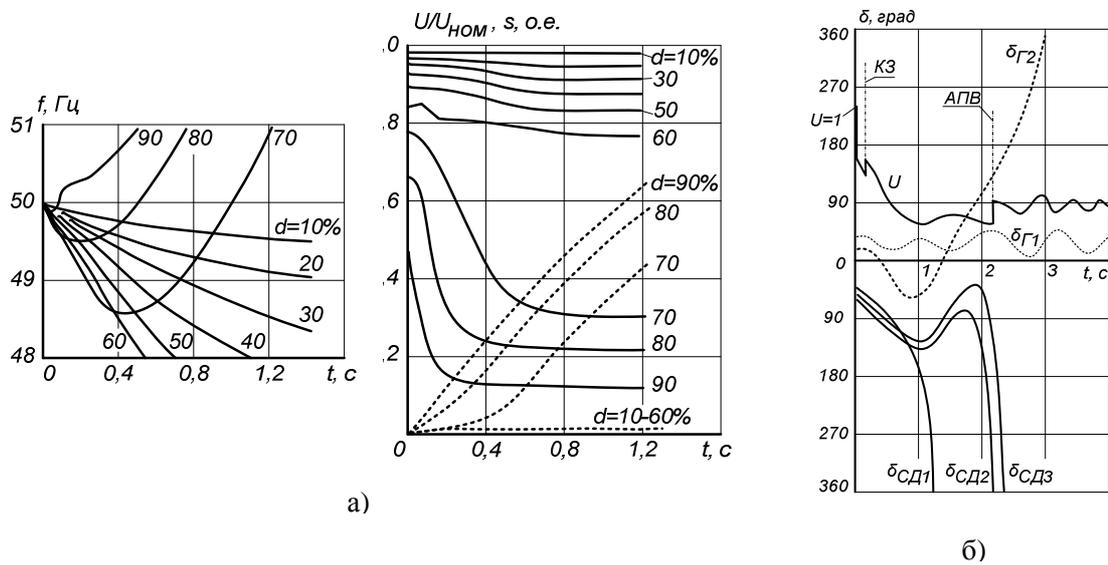


Рис. 2. Нарушения динамической устойчивости дефицитной энергосистемы.

Самоотключение электроустановок существенно меняет параметры послеаварийных режимов энергосистемы и сказывается на протекании переходных процессов. При КЗ вблизи отправного конца линии энергосистемы и, следовательно, наброса мощности на электропередачу ($P_{ПАР} > P_{ИР}$), вероятность нарушения устойчивости увеличивается. Наоборот, при КЗ вблизи приемного конца передачи снижение нагрузки дефицитного района уменьшается $P_{ПАР}$ и понижает вероятность нарушения устойчивости.

Доля отключающейся нагрузки в общей нагрузке узла может быть различной. В промышленных узлах она может составлять и 5 – 10%, и 60 – 80% в зависимости от типов электроустановок, их коммутационной аппаратуры, защиты и автоматики. Для крупных узлов нагрузки энергосистем эта доля в среднем составляет примерно 30%.

Более детальное представление нагрузки требуется тогда, когда нужно проанализировать устойчивость собственно нагрузки, например, при изучении причин нарушенной работы промышленных предприятий и при разработке соответствующих противоаварийных мероприятий. Тогда учет нагрузки становится основной задачей расчетов.

1. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / под ред. Л.А. Жукова. – М.: Энергия, 1979.

2. Веников, В.А. О возможности единого подхода к статической и динамической устойчивости электрических систем // Электричество. – 1976. – № 7. – С. 72-73.