

УДК 621.311

**Л. Б. Терешкевич, к. т. н., доц.; В. А. Милосердов, к. э. н., доц.**

## **АНАЛИЗ СИСТЕМНОЙ АВАРИИ С НАРУШЕНИЕМ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ**

*Проанализирована авария в энергосистеме с нарушением динамической устойчивости с целью недопущения или минимизации её последствий в результате принятия оптимальной стратегии действий в подобных ситуациях.*

**Ключевые слова:** *объединённая электроэнергетическая система, устойчивость системы, небаланс мощности, переходный процесс.*

### **Постановка проблемы**

Проблема устойчивости в электроэнергетике приобрела важное значение в связи с объединением электрических станций и сетей на параллельную работу, т. е. с момента создания электрических систем [1]. После ряда серьезных аварий в энергосистемах развитых стран (США, Германия, СССР), связанных с нарушением устойчивости, исследование этой проблемы признано приоритетным. В [2] отмечают, что, например, в системах Мосэнерго и Ленэнерго за период с 1932 по 1934 годы было 38 аварий, вызванных расстройством параллельной работы. Серьёзные осложнения в поддержании устойчивости объединённой электроэнергетической системы Украины вносят сложившийся на сегодняшний день дефицит топливноэнергетических ресурсов на ТЭС и, как следствие, веерные отключения потребителей. Дефицит активной мощности, возникающий из-за недостатка топлива на электростанциях, снижает запас устойчивости, приводит к невозможности поддержания номинальной частоты и может привести при неблагоприятных условиях к нарушению статической устойчивости системы по критерию текучести (сползания) параметров режима в форме "лавины частоты".

В литературе по данной проблеме [1, 3], кроме констатации фактов нарушения устойчивости, нигде не удается найти анализ причин, хода и последствий аварий. Без такого анализа невозможно совершенствование и повышение уровня квалификации дежурного и эксплуатационного персонала электрических станций и сетей, а также подготовка и обучение студентов-электроэнергетиков.

**Цель** статьи – выявление и анализ причин аварии в объединенной энергосистеме; представление хронологии развития аварии; анализ реагирования средств противоаварийной автоматики; оценка технологии восстановления устойчивого послеаварийного режима.

### **Результаты исследования**

Рассматриваем аварию (июнь 1997 г.), которая имела место в энергосистеме с условным названием ОЭ и привела к нарушению энергоснабжения потребителей более, чем на 10 часов, поэтому является весьма поучительной. Общая мощность генерации энергосистемы ОЭ может достигать 1655 МВт, но на момент времени к началу аварии фактическая генерация составляла 339 МВт, и это отражено на рис. 1, где видно, что общая нагрузка энергосистемы ОЭ  $P_n$  покрывалась собственной генерацией мощности  $P_r$  и мощностью  $P_t$  по транзитной ЛЭП-500 от энергосистемы ОЭУ. Связи с другими энергосистемами НЭ и БЭ были отключены.

Напомним, что нормальный установившийся режим в любой энергосистеме возможен только при обеспечении баланса мощности и, в первую очередь, активной мощности, "ответственной" за частоту в системе. Из рис. 1 видно, что в системе ОЭ в предаварийном

состоянии баланс активной мощности строго выполнялся, мощность небаланса  $P_{\text{нб}}$  отсутствовала ( $P_{\text{нб}} = P_{\text{н}} - P_{\text{г}} - P_{\text{т}} = 779 - 339 - 440 = 0$  (МВт)), что обеспечивало частоту в системе 50 Гц.

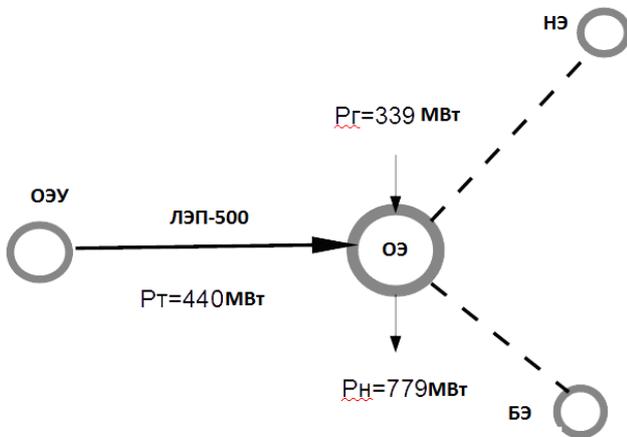


Рис. 1. Принципиальная схема связи ОЭ с другими системами

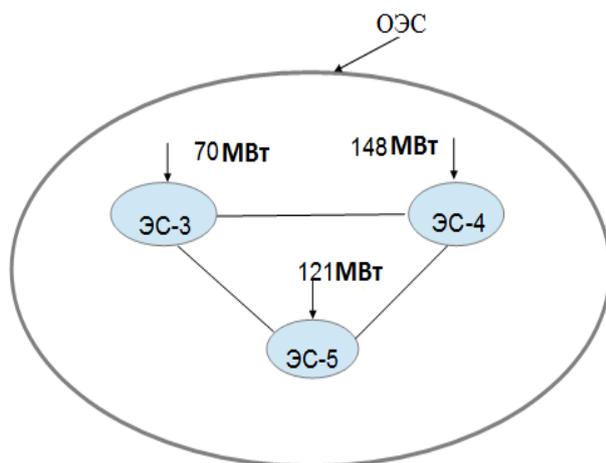


Рис. 2. Распределение общей генерации мощности в системе

Таким образом, при возникновении небаланса мощности может возникнуть следующая цепь событий: снижение частоты; уменьшение вращающих моментов электроприводов; снижение производительности механизмов собственных нужд и, в худшем случае, опрокидывание электродвигателей; полная остановка работы электростанций и прекращение энергоснабжения потребителей.

Для предотвращения такого негативного сценария в энергосистемах всегда предусматривают различные системы автоматики, в том числе автоматическое регулирование скорости турбин (АРС), автоматическую частотную разгрузку (АЧР) и другие. АЧР, например, по заранее определенному алгоритму обеспечивает принудительное отключение части потребителей для восстановления баланса активной мощности. Объем отключаемой нагрузки, очередность, временные и частотные уставки АЧР определяют заранее, исходя из ключевого требования – сохранения устойчивости системы. Если АЧР обеспечивает баланс мощности, можно говорить о благоприятном исходе аварии. В противном случае неизбежно наступает нарушение устойчивости энергосистемы – самое тяжелое последствие аварий.

Общую генерацию мощности в системе ОЭ в предаварийном режиме обеспечивали три параллельно работающие электростанции ЭС-3, ЭС-4 и ЭС-5 (рис. 2). Заметим, что нагрузка на шинах этих электростанций, ввиду их параллельной работы, чаще всего не соответствует их собственной генерации. Начало аварии – 11 ч. 56 мин. 40 с. по местному времени, когда произошло отключение ЛЭП 500 на питающем конце (рис. 1) и энергосистема ОЭ перешла на изолированную работу с мощностью небаланса, равной

$$P_{\text{нб}} = P_{\text{н}} - P_{\text{г}} - P_{\text{т}} = 779 - 339 = 440 \text{ (МВт)}.$$

Возникший небаланс мощности создает дополнительный тормозящий момент для роторов всех генераторов системы ОЭ. Он зависит от величины небаланса и инерционных характеристик вращающихся масс. Это приводит к снижению скорости роторов генераторов и, следовательно, к уменьшению частоты.

Потенциальная опасность снижения частоты в системе состоит в том, что может быть нарушена работа механизмов собственных нужд электростанций, таких как: питательные и циркуляционные насосы, вентиляторы, дымососы и др., привод которых осуществляется электродвигателями.

Таблица 1

## Телеметрическая информация о состоянии электрической системы

Время, ч. м. .	Частота, Гц	Р откл., МВт
11.56.4	50.00	0.00
11.56.5	47.52	52.80
11.57.0	48.44	76.00
11.57.1	48.28	92.6
11.57.2	47.96	32.4
11.57.3	47.88	14.00
11.57.4	47.80	0.00
11.57.5	47.80	0.00
11.58.0	47.80	0.00
11.58.1	47.80	0.00
11.58.2	47.80	0.00
11.58.3	47.52	5.10
11.58.4	47.20	1.20
11.58.5	47.08	0.00
11.59.0	47.00	6.00
Всего Р <sub>откл.</sub> , МВт		280.1



Рис. 3. Переходный процесс изменения частоты в системе ОЭ

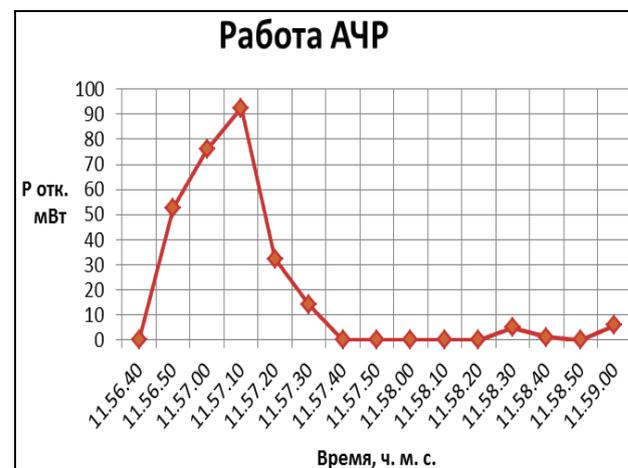


Рис. 4. Динамика отключаемой нагрузки средствами АЧР

Рассмотрим с этих позиций работу АЧР на электростанциях системы ОЭ после начала аварии, т. е. начиная с 11 ч. 56 мин. 40 с. местного времени. Обратимся к телеметрической информации и представим её в виде нижеследующей таблицы 1 и графиков на рис. 3. и рис. 4.

Из рассмотрения таблицы 1 и рис. 3, 4 видно, что:

- система АЧР вступила в работу через несколько секунд после начала аварии;
- за первые 30 секунд аварии АЧР выработала почти 80 % общего ресурса отключения нагрузки;
- в дальнейшем работа АЧР характеризуется меньшей интенсивностью отключения нагрузки;
- с начала аварии и до исчерпания заложенного ресурса АЧР частота в системе вначале быстро снижалась, затем несколько стабилизировалась на низком уровне, а далее монотонно ухудшалась;
- общий отключаемый ресурс АЧР в 280 мВт, составляющий около 36% от нагрузки системы в 779 мВт, в рассматриваемой аварии оказался малым.

Ввиду того, что возможности АЧР оказались уже исчерпанными, а частота продолжала убывать, благодаря средствам автоматики и вмешательству диспетчерского персонала система ОЭ стала разделяться на несинхронные части.

Такое развитие событий происходило в следующей последовательности:

1. в 11 ч. 59 мин. 29 с. автоматически выделилась на изолированную работу ЭС-3;
2. в 12 ч. 01 мин. 06 с. полностью сбросила нагрузку ЭС-4 (на профессиональном жаргоне – “села на 0”) из-за потери собственных нужд;
3. в 12 ч. 00 мин. 07 с. отключён блок № 2 ЭС-5, который был выделен на покрытие нагрузки собственных нужд;
4. в 12 ч. 05 мин. 43 с. блок № 5 ЭС-5 отключен из-за низкой частоты.

В результате такого хода событий была отключена нагрузка общей мощностью 711 МВт, т. е. имело место полное расстройство энергоснабжения потребителей из-за нарушения динамической устойчивости системы. Ниже на рис. 5, 6 приведены фрагменты лент самописцев мощности и частоты ЭС-5, отражающие телеизмерения на всем временном диапазоне аварии в системе.

Видно, что мощность генерации (вертикальная ось) на рис. 5 претерпевает сильное изменение: от нормальной величины 121 МВт (см. рис. 2) до резкого подъема, падения и последующей стабилизации на уровне, который обеспечивает нагрузку собственных нужд. Такое изменение мощности нужно рассматривать вместе с изменением частоты на рис. 6. Как можно объяснить такой большой всплеск генерации на начальном этапе переходного процесса?

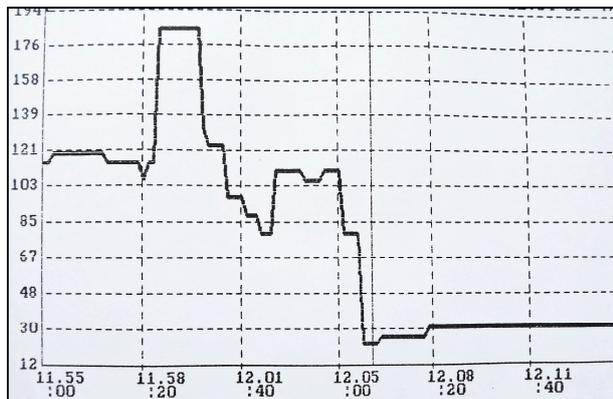


Рис. 5. Динамика изменения мощности (МВт) ЭС-5 во время аварии

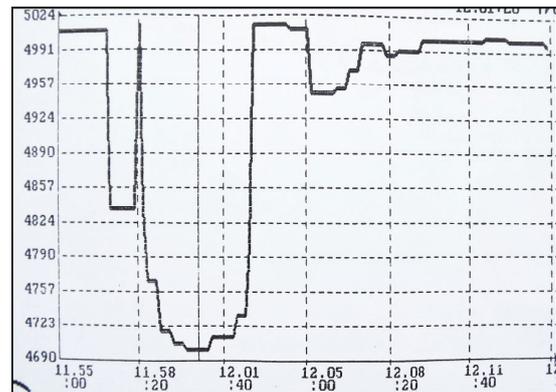


Рис. 6. Динамика изменения частоты (Гц) ЭС-5 во время аварии

Заметим еще раз, что в восстановлении баланса мощности в системе участвуют системы автоматической частотной разгрузки (АЧР) и автоматического регулирования скорости турбин (АРС). Первая осуществляет принудительное снижение нагрузки, а вторая – увеличение мощности генерации. Как отмечалось ранее, при параллельной работе станций их фактическая нагрузка, как правило, не сбалансирована с мощностью генерации. При отключении ЛЭП-500 наброс нагрузки на отдельные станции будет неодинаков. Эти два фактора приводят к тому, что и тормозящие моменты на генераторах параллельно работающих станций будут разными (на профессиональном жаргоне – они получают разные «толчки»). Неодинаковые тормозящие моменты вместе с разными инерционными характеристиками станций создают неодинаковые изменения скорости роторов генераторов и, следовательно, различающиеся частоты на разных станциях. Тогда и вступает в действие система АРС по повышению генерации мощности. Так можно объяснить рост мощности генерации (рис. 5) и падение частоты (рис. 6) на начальном этапе переходного процесса.

После разделения системы на несинхронно работающие части и отключения ЭС-4 переходный аварийный процесс фактически закончился с крайне тяжелыми последствиями. Далее начинается работа по восстановлению нормальной схемы системы ОЭ, которая проходила в следующей последовательности:

- 1) в 12 ч. 48 мин. по местному времени было подано напряжение на шины ЭС-4 по линии связи с системой НЭ (см. рис. 1);
- 2) в 13 ч. 36 мин. была включена ЛЭП-500 и началась ее загрузка ;
- 3) в 13 ч. 37 мин. была произведена синхронизация ЭС-3 с системой;
- 4) в 16 ч. 24 мин. была осуществлена синхронизация ЭС-5 с системой;
- 5) в 17 ч. 30 мин. был запущен в работу блок № 5 на ЭС-5;
- 6) в 20 ч. 40 мин. был запущен в работу один из турбогенераторов ЭС-4;
- 7) в 22 ч. 10 мин. были сняты все ограничения по системе ОЭ.

### Выводы

Проведенный анализ причин, хода и последствий аварии позволяет сделать некоторые выводы и предположения, которые могли бы помочь избежать или смягчить подобные явления в дальнейшем в системе ОЭ.

1. Необходимо увеличить собственную установленную генерирующую мощность.
2. Необходимо увеличить долю мощности, зарезервированной для отработки системой АЧР, по сравнению с общим объемом нагрузки.
3. Полезно рассмотреть более сложные алгоритмы управления АЧР по сравнению с существующим правилом работы по отклонению частоты, например, по отклонению небаланса мощности, ее скорости и даже ускорения.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Веников В. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / Веников В. А. – М. : Высшая школа, 1985. – 472 с.
2. Жданов П. С. Вопросы устойчивости электрических систем / Жданов П. С. – М. : Энергия, 1979. – 456 с.
3. Маркович И. М. Режимы энергетических систем / Маркович И. М. – М. : Энергия, 1969. – 394 с.

**Терешкевич Леонид Борисович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, тел. 46-53-57, lbter@meta.ua.

**Милосердов Валерий Александрович** – кандидат экономических наук, доцент кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, тел 57-48-03, valeriy\_miloserdov@mail.ru.

Винницкий национальный технический университет.