

бителей энергорайона на 5 %. В результате этого мероприятия поток по перегруженной линии снизится на 10 %, но этого не достаточно для устранения перегрузки. Поэтому приходится прибегнуть к крайней мере – отключению части электроприемников по графикам аварийных отключений. В таблице 1 приведена последовательность проводимых мероприятий по ликвидации перегрузки для нашего случая.

**Таблица 1. Ликвидация аварийной перегрузки линии электропередачи**

Мероприятие по устранению перегрузки	Время, прошедшее с начала аварийной перегрузки ВЛ, мин.		Ток в перегруженной линии, А
	Распоряжение	Исполнение, уведомление	
Распоряжение на сворачивание ремонтных работ на ВЛ «Борисов СШ 110 – Борисов Тяговая»	5	60	573
Распоряжение на снижение напряжения у потребителей на подстанциях: «Лощница», «Борисов Северная», «БПЗ», «Борисов тяговая», «Борисов западная», «Печи»	7	10	520
Ввод графиков аварийных отключений	10	15	428
Распоряжение на включение ВЛ «Борисов СШ 110 – Борисов Тяговая»	60	65	225
Восстановление нормального электроснабжения отключенных потребителей	70	75	295

### Литература

1. Калентионук, Е.В., Прокопенко, В.Г., Федин, В.Т. Оперативное управление в энергосистемах: учеб. пособие / Под общ. ред. В.Т. Фебина. – Минск: Вышэйшая школа, 2007. – 351 с.
2. Правила устройства электроустановок. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 640 с.

УДК 621.311

## СИСТЕМНЫЕ АВАРИИ И МЕРЫ ПО ИХ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЮ

*Петрашевич Н.С.*

Научный руководитель – канд. техн. наук, доцент КАЛЕНТИОНОК Е.В.

Число крупных аварий в энергосистемах во всем мире за последние 10–15 лет неуклонно растет. К примеру, по данным семинара СИГРЭ, прошедшего в 2003 году, в США в 1991–1995 годах было 7 аварий с отключениями мощности 1 000–3 000 МВт, а в период 1996–2000 годов – 13; наибольшая отключенная мощность составила 30 000 МВт.

За последние десятилетия произошло несколько развалов крупнейших энергообъединений, которые принесли огромный ущерб и привели к разработке специальных мероприятий против системных аварий.

Одной из первых системных аварий, вызвавших тяжелые последствия, была авария 13.07.1977 года в Восточном энергообъединении США с потерей мощности около 6 000 МВт. Во время этой аварии, например, только в Нью-Йорке отключение энергоснабжения на многие часы вызвало волну грабежей, были арестованы более 3 000 чел.

В прошлом веке были аварийные отключения мощности 10 000 МВт и более:

- 19.12.1978 года – Франция – 28 000 МВт;
- 14.12.1982 года – Хайдро-Квебек – 15 500 МВт;
- 27.12.1983 года – Швеция – 11 400 МВт;
- 12.01.1987 года – Франция – 12 000 МВт;
- 23.07.1987 года – Токио – 9 186 МВт;
- 08.06.1988 года – Хайдро-Квебек – 10 000 МВт;
- 1996 год – Северо-Запад США – 11 860 МВт;
- 10.08.1996 года – Калифорния – 30 392 МВт.

Увеличение числа аварий при неуклонном росте мощности энергообъединений вызывает опасения во всех странах мира с развитой энергетикой. В них подробно анализируются причины аварий, их развитие и восстановление работы энергосистем; разрабатываются методы защиты от таких аварий; особое внимание уделяется ситуации в энергообъединениях, возникающей с либерализацией рынка электроэнергии и обострением конкурентной борьбы в отрасли.

Выполним анализ аварии, произошедшей в энергосистеме Италии в 2003 году.

Предпосылки. Общей предпосылкой к аварии в Италии является нехватка электроэнергии. Уже в конце июня 2003 года сетевая компания Италии GTRN была вынуждена сократить подачу электроэнергии на крупные предприятия на 1 000 МВт. 26 июня было отключено 7,3 млн. потребителей. Энергокомпания ENEL делала все возможное, чтобы сохранить питание больниц и воинских частей.

Предпосылки к аварии 28.09.2003 г. вытекают из причин, повлекших за собой отключения в конце июня 2003 года:

- крайне высокие температуры в течение нескольких недель (во всей Европе) привели к превышениям потребления электроэнергии в критические месяцы по сравнению с 2001 годом на 2–3 ГВт за счет широкого использования кондиционеров;

- повышение температуры привело к ограничениям мощности и КПД ТЭС из-за высокой температуры охлаждающей воды, в то же время снизилось производство электроэнергии на РЭС (около 20 % производимой электроэнергии), из-за низкого уровня воды в реках;

- большая доля оборудования была выведена в профилактический ремонт;

- при сильной зависимости Италии от импорта электроэнергии снизились поставки электроэнергии из Франции (800 МВт). При среднем уровне потребления 55 250 МВт импорт составляет 6 300 МВт. Большая доля импорта электроэнергии может способствовать возникновению аварийных ситуаций. Погода также влияет на импорт – передающая способность связей с Францией и Швейцарией снизилась с 5 400 МВт в зимнее полугодие до 4 800 МВт в летнее.

Ход аварии. 28.09.2003 года массовое отключение электроэнергии в Италии, от южного Тироля до Сицилии, оставило без электроэнергии 57 млн. чел.; было отключено 39 крупных потребителей; для большинства крупных городов питание было восстановлено только через 5–9 ч; Рим был без электроснабжения 12 ч, некоторые города на юге – 24 ч.

По отчету западно-европейского энергообъединения UCTE до аварии импорт электроэнергии Италии из Франции, Швейцарии и Словении составлял 6 651 МВт (около 24 % потребления и на 300 МВт выше договорного уровня). Из-за падения дерева отключилась ВЛ 380 кВ «Mettlen – Laverno» в Швейцарии. Автоматическое повторное включение (АПВ) было unsuccessful из-за большого расхождения по углу. При перераспределении нагрузок на 10 % была перегружена ВЛ 380 кВ «Sils – Soazza». В соответствии с правилами, чтобы не произошло автоматическое отключение, нужно было в течение 15 мин освободить ВЛ от перегрузки. Оператор швейцарской сетевой компании ETRANS телефоновал оператору сетевой компании Италии GTRN о необходи-

мости снижения импорта на 300 МВт. После дискуссии, через 20 мин после перегрузки GTRN снизила импорт на 300 МВт, но это не дало результатов, поскольку еще через 5 мин отключилась ВЛ «Sils – Soazza» из-за перекрытия при падении на неё дерева. Через 4 с отключилась третья линия импорта «Airolo – Mettlen» и связи Италии с УСТЕ оборвались. Потеря синхронизма в этой связи и ее динамическое воздействие привели к коллапсу напряжения в Италии. Изоляция энергосистемы Италии и нехватка внутренних генерирующих мощностей с дефицитом 6,4 ГВт привели к снижению частоты в системе за 22 с до 48,5 Гц и автоматической разгрузке на 10 ГВт, что не дало эффекта, поскольку 21 из 50 ТЭС отключились в результате срабатывания реле минимальной частоты. Через 2,5 мин, когда частота упала до 47,5 Гц, Италия осталась без электроснабжения.

Отделение энергосистемы Италии от УСТЕ создало сложную ситуацию в европейской сети: частота повысилась до 50,25 Гц, были значительные колебания и непредсказуемые перетоки мощности; перегрузились линии от Франции к Германии и Бельгии, однако операторы УСТЕ ликвидировали опасную ситуацию.

Для стабилизации работы общей сети УСТЕ Германия отключила 3 500 МВт мощности, а Франция – 3 200 МВт. Если бы не взаимопомощь в европейской сети, масштабы аварии были бы значительно больше.

Чтобы восстановить электроснабжение Италии, импорт электроэнергии в нее уже через 10 ч был восстановлен до 85 % договорного уровня.

Конкретные причины. Специалисты Швейцарии утверждают, что операторы Италии в аварийных условиях слишком медленно решали проблему компенсации мощности отключившейся ВЛ, что привело к каскадному отключению других линий, в том числе связей с Францией, Швейцарией, Австрией и Словенией.

Противоречия в анализе со стороны Италии и стран-импортеров вызвали необходимость специального расследования причин аварии. Официальный отчет компании УСТЕ подтвердил правильность действий сетевого оператора ETRANS Швейцарии во время аварии.

Наиболее общая причина аварии – несовпадение коммерческих интересов с возможностями и надежностью сети.

Принимаемые меры. Уже после отключений, произошедших в энергосистеме, в июне Министерство энергетики Италии пришло к выводу, что необходимо вводить новые мощности. Министр промышленности предложил на 25 % повысить мощность электростанций в стране.

В первую очередь ENEL будет реконструировать остановленные электростанции, оборудование которых выработало свой ресурс; планируется постройка 36 новых электростанций, в частности, а настоящее время в Италии строятся электростанции комбинированного цикла Sermide (1 140 МВт), Pietrafitta (380 МВт), Termini Imerese (380 МВт).

Для снижения ущерба от крупных аварийных отключений разработана программа послеаварийного восстановления сети Италии, проведены ее испытания, результаты которых дали 16 успешных восстановлений работы энергосистемы и 3 развала.

Проведенный анализ причин аварии позволил наметить мероприятия в энергосистеме страны, ограничивающие возможность сетевых аварий:

- сдвиг периода профилактических ремонтов из периода максимума нагрузки;
- создание достаточного резерва мощностей даже ценой увеличения импорта;
- строительство новых электростанций лишь после реконструкции и оптимизации работы существующих.

Общие рекомендации были сформулированы следующим образом: уделять больше внимания использованию установок на фотоприемниках (в стране мною регионов с

высокой солнечной активностью), дотировать производство электроэнергии возобновляемыми источниками, особое внимание уделить энергосбережению за счет повышения эффективности промышленного и бытового оборудования; во всех случаях необходимо учитывать рост электропотребления в Италии на 3–4 % в год.

По мнению специалистов ФРГ, основные недостатки либерализации – это снижение мощностей электростанций и резерва мощности, экономия на финансировании сетей. Строгие меры по рационализации энергетики в ходе либерализации, близкие к перегрузке сети и высокие температуры во время летнего максимума делают такие развалы в Италии вполне возможными.

По мнению отечественных специалистов, неквалифицированное применение либерализации рынка электроэнергии может послужить причиной энергетического кризиса. Должно быть умелое сочетание конкуренции и рекомендательного планирования.

По расчетам EPRI (Electric Power Research Institute) непосредственные потери от неустойчивости работы передачи электроэнергии, перерывов электроснабжения и снижения качества электроэнергии ежегодно составляют около 100 млрд. дол.

При анализе аварии в Италии специалисты Швейцарии показали, что для их страны ситуация не вызывает опасений – в ней надежнейшая сеть, многие предприятия имеют собственные электростанции. Аварийные ситуации моделируются и изучаются. Главное же в европейской сети – наличие возможности дублирования связей и большие резервы мощности. Если бы не взаимопомощь в УСТЕ, летом 2003 года масштабы аварии были бы гораздо больше.

Разбор причин системных аварий привел к выработке конкретных мероприятий по их предотвращению, которые включают:

- анализ и периодические проверки состояния сети и систем защиты;
- непрерывный контроль и диагностику оборудования;
- расширение возможностей центров управления;
- ограничение режимов по условиям надежности в реальном масштабе времени;
- применение системных защит и адаптивных РЗ;
- проверку координации действия РЗ;
- оценку устойчивости по напряжению и динамической устойчивости;
- учет старения оборудования и улучшение профилактики;
- тренировки оперативного персонала;
- повышение надежности схем РЗ и автоматики;
- должна быть разработана программа восстановления работы энергосистемы после аварии.

Доаварийные подготовительные меры включают определение параметров электростанций и крупных потребителей с точки зрения их работы в энергосистеме.

Действия в аварийных условиях – это оценка состояния энергосистемы по всей схеме, деление сети, образование выделенных систем, обратное соединение сети.

Действия при разборе аварии – это оценка эффективности программы восстановления, поправки к программе, принятие новой стратегии восстановления, в частности, отношение к частотной разгрузке, учет динамических характеристик частей системы.

Помимо общих мероприятий по защите от системных аварий, предлагаются решения проблемы с помощью разработок ведущих компаний. Например, компания ABB Power System предлагает следующие пути повышения передающей способности ВЛ:

- повышение нагрузочной способности ВЛ за счет перевода их в режим работы не с номинальной, а с физически допустимой нагрузкой;
- разгрузка критических узлов сети с помощью регулирования потоков мощности;
- выполнение новых линий электропередачи в виде кабелей;

– электропередачи на постоянном токе как средство регулирования потоков мощности.

### Выводы

1. Происшедшие в последнее время крупные системные аварии в ряде стран объясняются ситуацией, когда при росте потребления электроэнергии не хватает пропускной способности сетей; большое влияние оказывает также старение оборудования электрических станций и сетей.

2. Одной из причин учащения системных аварий может служить либерализация рынка электроэнергии и связанная с ней конкурентная борьба. Необдуманное, без учета возможных последствий проведение либерализации может привести к формулировке «Прибыль вместо надежности». Способствуют снижению надежности работы энергообъединений свойственные такому подходу следствия: снижение инвестиций в электрические сети; снижение аварийного резерва мощности; некоординированность действий сетевых операторов разных компаний; сокращение расходов на профилактику и обновление оборудования.

### Литература

1. *Electra*. – 2003. – № 210. – P. 37–45.
2. Вести в электроэнергетике. – 2003. – № 5. – С. 40.
3. *Modern Power Systems*. – 2003. – Vol. 23, № 9. – P. 3–5.
4. *Modern Power Systems*. – 2003. – Vol. 23, № 11. – P. 29–32.
5. Вести в электроэнергетике. – 2003. – № 6. – P. 31–37.
6. *IEEE Power & Energy Magazine*. – 2003. – № 5. – P. 41–46.
7. Электрические станции. – 2005. – № 4. – С. 78–83.

УДК 621.311

## ПРОГРАММА РАСЧЕТА И АНАЛИЗА РЕЖИМОВ РАЗОМКНУТЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 6–35 КВ

Лысюк С.С.

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор ФУРСАНОВ М.И.

Разработана компьютерная программа Azimut 6-35 для расчетов и анализа установившихся режимов разомкнутых электрических сетей 6–35 кВ.

Программа написана на алгоритмическом языке высокого уровня C++ Builder [1].

Основные возможности программы:

1. Azimut 6-35 осуществляет ввод данных двумя способами:

– в табличном режиме – задаются номера соединяющих узлов ( $N_n$  и  $N_k$ ) схемы сети (рисунок 1);

– ввод параметров схемы в графическом режиме путем создания нового элемента сети и его привязка к другому элементу.

2. Графика:

– по схеме сети, заданной в табличной форме, программа строит разомкнутое «дерево» (граф) сети с нанесением необходимой топологической информации. Такой режим позволяет наглядно представить сеть и сэкономить время при кодировании полной схемы (рисунок 2);

– возможность создания объектов энергетики и привязка их к местности;

– растровая подложка карты местности с последующей привязкой к схеме сети;

– изменение свойств любого элемента;

– масштабирование схемы (рисунок 3).