

С.В. Смоловик

РОЛЬ «ЧЕЛОВЕЧЕСКОГО ФАКТОРА» В РАЗВИТИИ КРУПНЫХ СИСТЕМНЫХ АВАРИЙ

I. ВВЕДЕНИЕ

Аварийные режимы современных объединенных энергосистем неизбежны так же, как неизбежны инфекционные эпидемии в современном обществе. Наиболее уязвимым элементом электроэнергетической системы являются воздушные линии электропередачи из-за природных (грозовых, ветровых), техногенных (загрязнение изоляции) и антропогенных воздействий. Однако, правильное проектирование, резервирование оборудования и питающих магистралей, развитые системы защиты и противоаварийного управления позволяют достаточно быстро локализовать поврежденный участок и вывести его из работы, сохранив (с минимальными потерями) работоспособность системы. Крупные системные аварии, сопровождавшиеся отключением большого количества потребителей, нарушением параллельной работы электростанций и энергосистем происходили в прошлом и, по-видимому, в той или иной мере будут иметь место и в будущем. Насколько значительными будут их масштаб, социальные и экономические последствия зависит от того, насколько тщательно и объективно выполнен анализ уже происшедших событий.

В докладе приведен анализ трех известных аварий в энергосистеме северо-востока США (1965, 1977, 2003 гг.), а также аварии в Московской энергосистеме в мае 2005 года.

Во всех из них проявилось влияние так называемого «человеческого фактора», то есть ошибок проектирования, недостаточного внимания к нормам обеспечения работы энергосистемы (несколько аварий были вызваны или усугублены перекрытиями между проводами линий и деревьями, расположенными вдоль трассы ВЛ), неправильных действий персонала на разных этапах развития аварий. Одним из таких факторов является хроническое неприятие энергетиками западных стран идей о необходимости постоянного совершенствования систем противоаварийного управления, которые должны развиваться параллельно, а лучше всего опережающими темпами по отношению к другим системам режимного регулирования, обеспечивающим эффективное функционирование энергосистемы (например, устройствам FACTS, автоматической частотной разгрузке (UFLS-Underfrequency Load Shedding), автоматической разгрузке по факту снижения напряжения (UVLS – Undervoltage Load Shedding) и т.д.).

II. АВАРИИ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ США

Первая авария (1965 г.) была неизбежна, поскольку была обусловлена принципиальными просчетами в организации режимов работы энергосистемы, отсутствием автоматической частотной разгрузки (АЧР), абсолютно неприемлемым подходом к организации энергоснабжения собственных нужд электрических станций. Рано или поздно сочетание указанных факторов должно

было проявиться в виде каскадного развития незначительного аварийного возмущения. Следует отметить, что на тот момент развитие энергосистемы явно опережало состояние средств анализа режимов, расчетов переходных процессов, математического моделирования и оперативного управления. По результатам анализа аварии 1965 года были сделаны серьезные выводы в части повышения надежности энергоснабжения собственных нужд электростанций, улучшения систем автоматического управления, усиления сетей и так далее. Было принято решение о внедрении устройств автоматической частотной разгрузки. Однако локальная система АЧР в Нью-Йорке была выполнена с грубыми просчетами, что не замедлило проявиться в ходе аварии 1977 года.

Развитие аварии

В 17:16:11 09.11.1965 резервная релейная защита (реле сопротивления) ошибочно зафиксировала опасную величину мощности на одной из пяти линий 230 кВ, отходящих от гидроэлектростанции Beck № 2 (1200 МВт) в Канаду и отключила ее. Электростанция Beck № 2 расположена на реке Ниагара и принадлежит компании Ontario Hydro. Поток мощности перераспределился на оставшиеся четыре линии этого же класса, которые последовательно отключились в течение 3 секунд. Приблизительно 1500 МВт изменили направление и потекли на юго-восток в сторону Нью-Йорка. Группа гидроэлектростанций в районе реки Ниагара, стала выпадать из синхронизма и существенно перегрузила связь 345 кВ Ниагара-Рочестер-Сиракузы-Утика-Олбани-Нью-Йорк. Напряжение в средней точке связи (подстанция Утика) упало, и в 17:16:15 отключились две гидроэлектростанции, расположенные на реке Св. Лаврентия и связанные с подстанцией Утика. Были отключены также связи этих станций с ЭЭС провинции Онтарио.

Генераторы гидроэлектростанции Beck не были оборудованы защитой, отключающей их при потере связи с ЭЭС Канады. Одновременное отключение пяти линий электропередачи в направлении ЭЭС Канады рассматривалось как невероятное событие.

Через четыре секунды после первоначального отключения линий в районе гидроэлектростанции Beck большая часть системы CANUSE, расположенная к востоку от штата Мичиган, распалась на четыре изолированных сегмента, что иллюстрируется рис. 1.4 и рис. 1.5 (нумерация подсистем соответствует номерам на рис. 1.4 и рис. 1.5):

1. Система Ontario Hydro полностью отделилась от штата Нью-Йорк с большим дефицитом.
2. Северная часть штата Нью-Йорк отделилась, имея достаточную мощность генераторов (на гидроэлектростанциях).
3. Район, примыкающий к реке Ниагара и юго-восточной части озера Эри (New York State Electric and Gas Co.) отделилась со

значительным избытком генерирующих мощностей. Следует подчеркнуть, что в американской практике *избыток генерации* обычно приводил к полному *погашению района*. Это связано с отсутствием координации защит турбоагрегатов от повышения частоты. Эти защиты имеют одну и ту же уставку по частоте и срабатывают без выдержки времени, вызывая массовое отключение от сети работоспособных генераторов. Возникающий после этого значительный дефицит мощности приводит к лавине частоты, то есть к быстрому снижению частоты в выделившемся районе, снижению напряжения и прекращению электроснабжения всех потребителей. Так развивался процесс в районе г. Кливленд в 1965 году. Точно так же произошло погашение крупного энергорайона в северной части штата Нью-Йорк в 2003 году из-за одновременного отключения нескольких атомных электростанций.

4, 5. Восточная часть штата Нью-Йорк, включая город Нью-Йорк и энергосистему штатов Новой Англии. Электроснабжение Нью-Йорка осуществлялось компанией Consolidated Edison. Энергосистема штатов Новой Англии впоследствии отделилась, но сохранила внутренние связи; точно то же самое происходило и в 2003 г.

В последней выделившейся зоне, включающей город Нью-Йорк, события продолжали развиваться в основном из-за образовавшегося дефицита мощности, который составлял около 1100 МВт.

Из-за возникшего дефицита мощности, в условиях отсутствия автоматической частотной разгрузки и делительной автоматики, произошла лавина частоты и в 17:27 электроснабжение Нью-Йорка практически полностью прекратилось. Необходимо отметить, что на момент начала аварии система Consolidated Edison Co. имела вращающийся резерв в объеме 1650 МВт. Однако, отсутствие соответствующих автоматических устройств и несогласованность действий персонала не позволили реализовать сколь либо заметную его часть. Единственным способом спасения системы было бы действие автоматической частотной разгрузки. Однако этот вид автоматики не был внедрен в энергосистеме, поскольку постоянное наличие вращающегося резерва, составляющего 15-20% от мощности нагрузки, воспринималось как полная гарантия сохранения ее работоспособности. О взглядах служб проектирования и эксплуатации на надежность электроснабжения говорит тот факт, что после лавины частоты некоторые тепловые электростанции потеряли питание собственных нужд. Это, в частности, привело к остановке масляных насосов, вследствие чего были повреждены шейки валов, уплотнения, турбинные лопатки. Сгорели турбинные подшипники генератора № 3 электростанции Ravenswood мощностью 1000 МВт, расположенной в черте г. Нью-Йорк. Всего было выведено из строя 1500 МВт генераторных мощностей.

Питание было восстановлено приблизительно к 10 утра следующего дня. Всего пострадало более 30 миллионов человек. Величина отключенной мощности составила более 30 000 МВт. Максимальное время перерыва электроснабжения достигло 13 часов 30 минут (в Нью-Йорке), среднее время составило около 6,5-7 часов.

В качестве рекомендаций Федеральная Энергетическая Комиссия (FPC) высказала следующее:

1. Безусловное обеспечение надежного энергоснабжения систем собственных нужд электростанций.

2. Внедрение резервных источников питания на важных объектах.

3. Внедрение устройств автоматической частотной разгрузки.

4. Усиление сетей.

5. Уменьшение сроков проверки уставок устройств релейной защиты (РЗ).

6. Увеличение резервов генерирующих мощностей.

7. Выполнение исследования соответствия существующих систем автоматики, систем связи, регистрирующих устройств и рабочих процедур, выполняемых в диспетчерских и локальных контрольных центрах (в том числе на электростанциях) в случае возникновения аварийных ситуаций.

Авария 1977 года была вызвана тяжелейшим природным (грозовым) воздействием на энергосистему. Однако, неправильные действия релейных защит, дополненные функциональными недостатками системы АЧР, привели к тому, что в полностью работоспособной системе, имевшей 1200 МВт вращающегося резерва и около 800 МВт быстрозапускаемых газотурбинных агрегатов, произошла «лавина частоты» и последующее прекращение энергоснабжения на 25 часов с соответствующими экономическими и социальными последствиями.

Развитие аварии

13 июля 1977 года в 20 часов 30 минут энергосистема Нью-Йорка несла нагрузку 5860 МВт. Из них 3000 МВт генерировалось в пределах Нью-Йорка и 2860 МВт передавалось по линиям 345 и 500 кВ с севера и от двух электростанций, расположенных на правом берегу реки Гудзон (около 800 МВт) выше по течению. Имелись связи с гидроэлектростанциями в северо-западной части штата (переток мощности составлял около 1200 МВт), с энергосистемой Новой Англии (штат Коннектикут) и с энергосистемой штата Нью Джерси.

С северо-запада 13.07.1977 года к Нью-Йорку приближался мощный грозовой фронт, и в 20:37 произошел удар молнии в опору двухцепной линии электропередачи 345 кВ между подстанциями Buchanan и Millwood. Ударом молнии были поражены обе цепи. Всего было зафиксировано около 14 серьезных повреждений, вызванных грозовыми воздействиями.

К моменту времени 21:29 автоматически и вручную были отключены все связи компании Consolidated Edison со смежными энергосистемами. Концентрированная энергосистема Нью-Йорка отделилась с дефицитом около 1700 МВт. Частота в системе начала снижаться и упала до 58,3 Гц. После срабатывания третьей очереди системы автоматической частотной разгрузки частота стала возрастать.

Однако, в условиях системы электроснабжения огромного города, выполненной в основном с помощью маслonaполненных кабелей высокого давления (138, 230 и 345 кВ), отключение 1800 МВт нагрузки привело к резкому скачку напряжения. Системы регулирования возбуждения генераторов городских электростанций стали уменьшать токи возбуждения. Релейная защита генератора № 3 электростанции Ravenswood (1000 МВт) оценила изменение направления потока реактивной мощности как признак обрыва цепи возбуждения и дала команду на отключение этого генератора от сети. После потери 870 МВт, которыми питал сеть этот генератор, в энергосистеме Нью-Йорка произошла классическая «лавина частоты». Последняя очередь

автоматической частотной разгрузки сработала, но ее мощности оказалось недостаточно. В 21:36 энергосистема погасла.

Восстановление электроснабжения заняло около 25 часов. В основном продолжительность перерыва электроснабжения была связана с необходимостью обеспечения питания масляных насосов, обеспечивающих давление масла в кабелях, от мобильных энергоустановок, поскольку питание систем собственных нужд городских подстанций было прекращено.

Напомним, что к моменту начала событий энергосистема Нью-Йорка имела 1200 МВт вращающегося резерва (из которого удалось реализовать около 600 МВт) и 790 МВт газотурбинных установок (ГТУ), которые по разным причинам не смогли оказать помощь.

Основными причинами развития аварии являлись грубые ошибки в настройке релейных защит и неудовлетворительная структура АЧР. Диспетчер не имел ясного представления о реальной структуре сети, возникшей вследствие многочисленных коммутаций, что затруднило правильное принятие решений.

Прямые убытки, связанные с аварийным недоотпуском электроэнергии составили около 50 млн. долларов. Косвенный ущерб, связанный с актами грабежа и насилия из-за отсутствия освещения и отключения всех систем сигнализации превысил 500 млн. долларов. Комиссия правительства США приняла решение о том, что авария была катастрофой природного характера. Большая часть убытков была покрыта из федерального бюджета.

За 26 лет, прошедших с момента аварии 1977 года, в электроэнергетической системе США произошли существенные изменения, в первую очередь реструктуризация, то есть разделение энергокомпаний на более мелкие структурные единицы. Формально были усилены позиции Североамериканского совета по надежности электроснабжения, рекомендации которого приобрели обязательный характер. Однако снова развитие структуры энергосистемы опередило возможности системы управления, что и проявилось в ходе развития масштабной энергетической катастрофы 14 августа 2003 года. Неблагоприятное течение событий усугубилось тремя перекрытиями воздушных линий электропередачи на деревья и совершенно невероятными отказами сначала основного, а затем и резервного компьютеров в энергосистеме First Energy, обеспечивающих обработку телеметрической информации. На последних этапах развитие событий осложнилось несогласованностью защит электростанций и недостаточной мощностью АЧР. На высоте оказались только защитные системы атомных электростанций, которые обеспечили вывод станций из работы и расхолаживание реакторов. Изучение опубликованных материалов создало у авторов пособия впечатление, что службы оперативного управления энергосистем северо-востока США во-первых, чрезмерно полагались на действия устройств автоматического управления, систем компьютерной поддержки и т.п., а во-вторых, были скованы соображениями экономического характера и не предпринимали эффективных действий по делению системы, ограничению или отключению потребителей вплоть до момента необратимого развития событий.

III. АВАРИЯ В МОСКОВСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЕ 24.05.2005

Необходимо отметить, что при сложившейся динамике развития энергосистемы Центра возникновение аварийной

ситуации, подобной той, что произошла 24.05.2005 в Москве было более или менее закономерным событием. Безусловно, в неблагоприятное развитие аварии внесли свою долю бездействие персонала на подстанции Чагино и чрезмерно оптимистический расчет режима, выполненный специалистами ЦДУ ЕЭС в ночь на 25 мая 2005 года. Однако в Московской энергосистеме отсутствовали устройства аварийной разгрузки по напряжению и не уделялось достаточного внимания локальным устройствам регулирования напряжения. Одним из решающих неблагоприятных факторов была абсолютно недостаточная пропускная способность средств связи, которые использовал оперативно-диспетчерский персонал. Следует признать, что после аварии были сделаны серьезные выводы, что позволит вывести технические средства управления на существенно более высокий уровень.

В определенном смысле Московская авария дала определенный толчок развитию инфраструктуры всей электроэнергетической системы России.

Развитие аварии

Основные события развивались вокруг мощной подстанции Чагино, расположенной на юго-востоке Москвы. ОРУ подстанции имеет системы шин трех классов напряжений – 500, 220 и 110 кВ, в том числе:

- 500 кВ – 2 системы шин с двумя выключателями на присоединение, АТ-1 и АТ-2 со стороны 500кВ не имеют выключателей и подсоединены к шинам через разъединители, а АТ-6 через один выключатель.
- 220кВ – 2 секционированные системы шин с двумя выключателями на присоединение, АТ-4 имеет один выключатель.
- 110кВ – 2 секционированные системы шин с обходной.

К подстанции подключено 3 линии 500 кВ, 9 линий 220 кВ, 12 линий 110 кВ.

Основным фактором, обусловившим неблагоприятное развитие событий, является потеря питания собственных нужд подстанции, что вызвало остановку компрессоров и падение давления воздуха в магистралях.

В создавшейся сложной обстановке персонал подстанции Чагино не принял и не реализовал необходимых решений. В условиях снижающегося давления воздуха в магистралях следовало разобрать разъединителями присоединения системы шин 500 кВ. Все выключатели были отключены, поэтому такая операция была безопасной. Последующие события происходили из-за бездействия персонала и приближали неотвратимые последствия.

Начиная с 23.41 из-за падения давления воздуха начинаются самопроизвольные включения воздушных выключателей 500 кВ подстанции Чагино. Включение происходит на устойчивое короткое замыкание на стороне 110 кВ АТ-1, что привело к разрыву кольца ВЛ 500 кВ, окружающего Москву.

В 03.25 после запроса диспетчера Московского РДУ и разрешения диспетчера ОДУ Центра отключена ВЛ 500 кВ Пахра – Чагино (со стороны подстанции Пахра), чем снято напряжение со 2-й СШ 500 кВ ПС Чагино. После ряда возмущений на ступени напряжения 110 кВ подстанция окончательно потеряла питание собственных нужд. Таким образом, к утру 25.05.2005 г. Московская энергосистема оказалась существенно ослабленной.

Службы энергосистемы готовились к утреннему подъему нагрузки.

С учетом погашения ПС 500/220/110 кВ Чагино и отключения всех отходящих от нее ВЛ прибывшими по аварийному вызову руководителями Службы электрических режимов Московского РДУ (начальник службы прибыл в 23.00 24.05.2005, заместитель начальника службы прибыл в 22-12 24.05.2005) была проведена оперативная проверка соответствия планового баланса мощности (генерация, потребление) и режима работы электрической сети Московской энергосистемы в создавшейся схеме требованиям нормативных документов к области допустимых режимов. В ее рамках были выполнены расчеты режимов на период максимума нагрузки с учетом расчетных возмущений.

Однако при увеличении нагрузки стал развиваться процесс отключения линий 220 кВ из-за теплового удлинения проводов. Всего было отключено не менее 8 ВЛ. Параллельно развивался процесс снижения напряжений в сетях 110 – 220 кВ (в сети 110 кВ до 85-90 кВ), приведшее к лавине напряжения. Итогом лавины напряжения явилось полная или частичная потеря генерации на целом ряде электрических станций в Московской энергосистеме и нескольких станций в Тульской энергосистеме.

В результате дальнейшего каскадного развития аварии в Московской энергосистеме была отключена 321 подстанция, в том числе 16 ПС 220 кВ, 201 ПС 110 кВ, 104 ПС 35 кВ. В результате этого произошло отключение потребителей:

- Московской энергосистемы – порядка 2500 МВт,
- Тульской энергосистемы – 900 МВт,
- Калужской энергосистемы – 100 МВт,
- Рязанской энергосистемы – 26,5 МВт,
- Смоленской энергосистемы – 13 МВт.

При массовых отключениях ВЛ 110-220 кВ и генерирующего оборудования электростанций возможности оперативно-диспетчерского персонала по обработке и анализу больших объемов информации, поступающей в основном по средствам телефонной связи, и принятию адекватных мер по предотвращению развития аварии были исчерпаны.

Тем не менее, около 12-30 25.05.2005 развитие аварии было остановлено действием оперативного персонала и устройствами автоматики. Все отключения, выполненные оперативным персоналом и автоматикой, были осуществлены штатно и без повреждений. В процессе развития аварии вторичных технологических нарушений с повреждением оборудования и несчастных случаев не было. Несмотря на сложность режима в условиях развития аварии сеть 500 кВ и ЕЭС России не были затронуты аварийным процессом. Все это позволило ограничить масштабы аварии и восстановить работу оборудования и электроснабжение потребителей в сжатые сроки.

Недоотпуск энергии составил около 100 млн. кВт-часов, сумма ущерба была оценена в 1 600 000 000 рублей.

По результатам анализа развития аварии был принят целый ряд решений по увеличению генерирующих мощностей в Московском регионе, по внедрению средств регулирования напряжения и, главное, по существенному увеличению возможностей средств измерения и обработки информации.

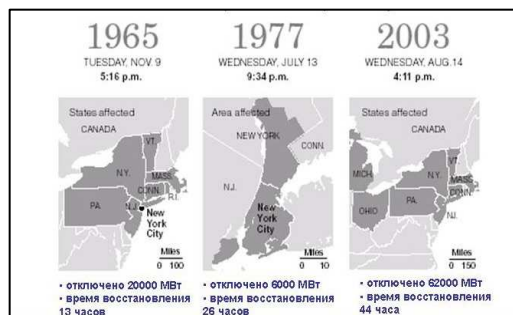


Рис.1. Обзор аварийных событий на северо-востоке США.

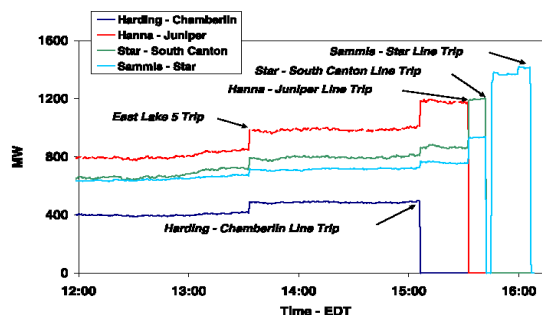


Рис.2. Последовательные отключения линий 345 кВ в зоне ответственности компании First Energy

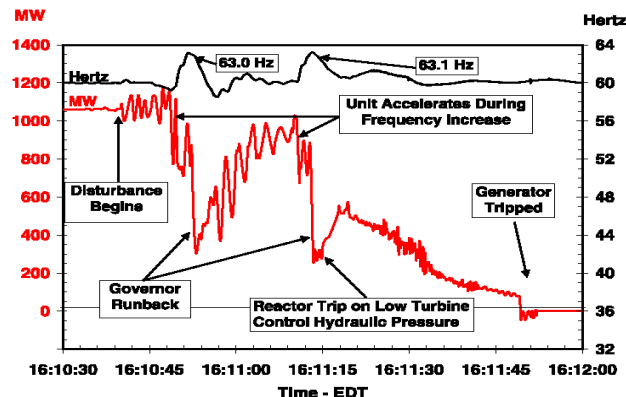


Рис.3. Изменение частоты и действие системы регулирования АЭС в избыточном районе

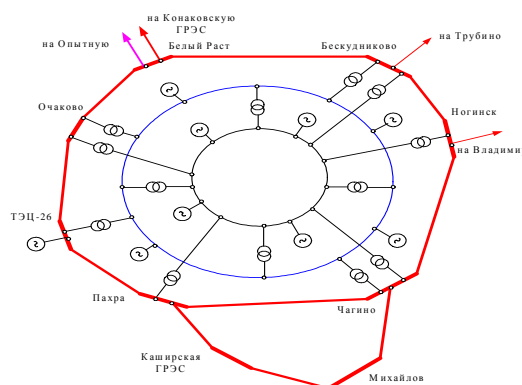


Рис. 4. Структура Московской энергосистемы