РАЗДЕЛ XXXVI. ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Осташев А.А., Колистратов М.В.
Каскадный эффект в электроэнергетике

МГТУ им. Н.Э. Баумана
(Россия, Москва)

doi: 10.18411/lj-06-2021-332

Аннотация

В представленной работе рассматриваются аварии в электроэнергетике как вид техногенных катастроф. В историческом ракурсе рассмотрены несколько крупных аварий в электроэнергетике (блэкауты) и проанализированы их причины. Особое внимание уделено каскадному эффекту и его роли в указанных катастрофах. На основе анализа современного российского законодательства проанализированы правовые методы обеспечения безопасности в сфере энергетики. Конечная цель работы – дать представление о роли каскадных процессов в электроэнергетических системах.

Ключевые слова: электроэнергетика, авария, каскадный эффект, блэкаут.

Abstract

In the presented work, accidents in the electric power industry are considered as a type of man-made disasters. Several major accidents in the electric power industry (blackouts) are considered from a historical perspective and their causes are analyzed. Special attention is paid to the cascade effect and its role in the indicated disasters. Based on the analysis of modern Russian legislation, the author analyzes the legal methods of ensuring security in the energy sector. The ultimate goal of the work is to give an idea of the role of cascading processes in power systems.

Keywords: electric power, accident, cascade effect, blackout.

Аварии на технических объектах несут экономическую, экологическую, социальную опасность – аварии на АЭС, авиационные катастрофы, прорывы плотин, аварии на химических предприятиях, аварии в энергосистемах и т.д. С повсеместным внедрением электроники в технологические процессы управления энергией, электричество играет ключевую роль в техногенных катастрофах 20-21 вв. Техногенная катастрофа – неуправляемый и неблагоприятный процесс на каком-либо техническом объекте, повлекший за собой его повреждение/разрушение, значительный ущерб здоровью людей или человеческие жертвы, а также негативное влияние на окружающую среду. В отличие от природных катастроф, причинами которых являются природные явления (смерч, землетрясение, цунами), техногенные катастрофы являются следствием умышленных или неумышленных действий человека.

Авария в энергосистеме (блэкаут) – нарушение нормального режима всей или значительной части энергетической системы, связанное с повреждением оборудования, временным недопустимым ухудшением качества электрической энергии или перерывом в электроснабжении потребителей. В авариях в энергосистемах особую роль может играть так называемый «каскадный эффект».

Каскадный эффект (каскадный процесс) – непрогнозируемая последовательность событий, вызванная определённым действием, влияющая на всю систему. Данный термин используется в различных областях науки – в авионавтике, медицине, экологии. В случае возникновения чрезвычайных ситуаций техногенного характера, в частности при авариях в электроэнергетике, каскадный эффект означает динамику, в которой воздействие конкретного события (в т.ч. человеческого фактора)

порождает последовательный разрушительный процесс всей системы. Начальное воздействие, подобно «эффекту домино», может не оказывать серьёзного влияния на систему в целом, но ряд таких процессов способен запустить цепочку событий, ведущих к значительным негативным последствиям. Опасность подобных явлений связана с величиной уязвимости, нежели с первоначальной их опасностью. Ряд системных сбоев, не представляющих опасности сами по себе в отдельности, вместе образует сложную и многоуровневую проблему, решение которой на заключительной фазе протекания практически невозможно.

Г. Пескароли и Д. Александр в работе "Определение каскадных катастроф и каскадных эффектов: выход за рамки метафоры "опрокидывания домино"", представленной на форуме в Давосе в 2015 году [1], указывали на различные виды причинно-следственных связей: (а) линейные пути цепных эффектов и (б) сложные пути каскадов. В «каскадных катастрофах» вторичные становятся центром кризиса, усугубляя чрезвычайную обстановку. Тем самым они определяли каскадные катастрофы как «экстремальные события, при которых каскадные эффекты прогрессируют с течением времени...» В электроэнергетике такие аварии, как правило, являются следствием нерешённых проблем обеспечения безопасности электроэнергетических систем. Влияние таких факторов можно проследить в следующих примерах аварий, имевших место в мировой истории 20-21 вв.

Авария в энергосистеме в Нью-Йорке, также известная как «Ночь страха», произошла с 13 на 14 июля 1977 года. Массовое отключение электроснабжения Нью-Йорка также сопровождалось массовыми грабежами, поджогами и прочими беспорядками. 13 июля 1977 года, 20:37 (по местному времени) – во время грозы молния бьёт в 345-киловольтную подстанцию Buchanan South. Удар второй молнии вызывает отключение двух 345-киловольтных ЛЭП, соединяющих 900-мегаваттную АЭС Индиан-Пойнт с Нью-Йорком. Техники компании «Consolidated Edison» пытаются дистанционно запустить аварийные турбогенераторы, но эта операция заканчивается неудачно, поскольку на генераторной подстанции отсутствовал персонал. В 20:55 очередной удар молнии бьёт в две ЛЭП – наступает перегрузка линий, ведущих от подстанции Спрейнбрук. Сотрудники «Con Edison» вручную снижают нагрузку на ещё один генератор на станции Ист-Ривер. В 21:19 из-за провисания проводов замыкается очередная ЛЭП. На всех остальных ЛЭП начинают срабатывать аварийные выключатели. 21:27 – отключается 1-гигаваттная Рейвенсвудская ТЭЦ. Город Нью-Йорк погружается во тьму. Начинаются массовые беспорядки. Было разграблено более 1500 магазинов, общий ущерб от беспорядков оценивается, по разным источникам, в 300 млн — 1 млрд долларов. Энергоснабжение было восстановлено к вечеру 14 июля.

Причинами блэкаута-1977 послужили следующие события: во-первых, погодные условия (гроза). Сами по себе удары молнии в ЛЭП не способны вывести из строя энергосистему, если только – во-вторых, неудовлетворительное состояние предохранителей на множестве ЛЭП, незакрученные контргайки вследствие нерегулярных технических осмотров. В-третьих, неподготовленность персонала компании «Con Edison», не воспринявших всерьёз слова представителей конкурирующей фирмы об экстренном сбросе напряжения в сети. В совокупности всех фактов, каскадный эффект начался в момент череды попаданий молний в ЛЭП, а критический момент наступил, когда вместо контролируемого отключения потребителей от электроэнергии диспетчеры приняли решений о поэтапном снижении напряжения. Последним фактором оказалась перегревшаяся от нагрузки и провисшая ЛЭП, замкнувшая всю цепь энергосистемы, что привело к отключению центральной системы энергоснабжения. Тем самым данная авария в энергосистеме была спровоцирована тяжёлыми погодными условиями и усугублена технической неподготовленностью персонала (человеческий фактор), что привело к значительному материальному ущербу, вызванному экономическим кризисом в США в 1970-х гг.

В России показательным примером стала авария в энергосистеме в Москве 25 мая 2005 года. Она затронула несколько районов Москвы и Подмосковья, а также Тульскую, Калужскую и Рязанскую области. Первым звеном в аварии стал пожар на одном из шести понижающих трансформаторов на подстанции №510 «Чагино», на юго-востоке Москвы районе Капотни, 23 мая около 17:30. Он был быстро потушен, а питание было переключено на оставшиеся пять автотрансформаторов. 24 мая 21:07 – происходит возгорание четырёх трансформаторов, а вытекающее из обмоток масло воспламеняет траву. Нагрузка на оставшийся трансформатор резко увеличивается, начинается процесс постепенного сброса мощности. Первым отключают Московский нефтеперерабатывающий завод (МНПЗ) – чтобы избежать аварии, газ выбрасывается в атмосферу и сжигается. Работа подстанции «Чагино» остановилась, начались перебои в энергосистеме.

Тем не менее, каскадный эффект только набирал силу. Как выяснит рабочая группа Госдумы по расследованию энергокризиса, ключевую роль сыграла авария на подстанции 500 кВ №214 «Очаково» [5]. Сработавшая релейная защита вызвала отключение воздушных линий ВЛ-220 кВ, что привело к падению уровня напряжения в сети до 90 кВ (вместо 110 кВ). Также была потеряна генерация на ГЭС № 1, на семи ТЭЦ и ГРЭС-4. 10:10 – отключаются подстанции «Ногинск», «Пахра», «Калужская», «Михайловская». Московское энергетическое кольцо разорвано окончательно, отключаются пять московских электростанций ТЭЦ и ещё 15 питающих центров. Каскадная катастрофа достигает пика, когда вслед за московскими ТЭЦ останавливают работы центры, обеспечивающие электроэнергией регионы – Алексинская ТЭЦ, Новомосковская ГРЭС, Ефремовская ТЭЦ, Щёкинская ГРЭС.

Была парализована работа промышленных предприятий, транспорта, коммунальных служб. Перебои с электроэнергией повлияли на работу банков, связи, торговли, органов власти и управления. По данным на 1 июня 2005 года, Москва оценивала потери в 1,708 млрд рублей, а Московская область — в 503,94 млн рублей. Тульская область определила сумму убытков в 436 млн 800 тыс. рублей. Причины данной катастрофы разбирали комиссия РАО ЕЭС, рабочая группа Госдумы и следственная группа прокуратуры. Официальные итоги расследования выявили, во-первых, устаревшее оборудования, используемое «Мосэнерго» на предприятиях: Чагино, Пахра, Очаково, Восточная, Карачарово, Угреша и т.д. Во-вторых, жара, установившаяся в Москве, привела к возросшему уровню потребления электроэнергии (подключение кондиционеров). Это способствует повышению температуры охлаждающей жидкости (масла) в трансформаторе. При старой изоляции возможно возгорание масла даже при небольшом превышении эксплуатационных параметров, изоляцию «пробивает», возникает разряд, и пары масла воспламеняются, иногда со взрывом («хлопок») и – отключается электрооборудование. В-третьих – непрофессионализм руководства РАО «ЕЭС России» и «Мосэнерго». Эксперт по проблемам энергетики Виктор Кудрявый в сентябре 2009 года писал, что ввиду проводимых реформ в сфере энергетики, вопрос теплоснабжения должным образом решён не был: «Авария показала, что таким региональным энергокомплексом, где единое имущественное и контрактное право было разрушено, управлять аварийной ситуацией невозможно. Усложнилась работа электрических диспетчеров Системного оператора, команды которых доходят до разных собственников с большой задержкой» [6]. Человеческий фактор вновь, как и вышеописанных авариях, оказал существенное влияние на процесс развития блэкаута-2005 в Москве. Основными же причинами аварий в электроэнергетике выделяют: устаревший парк электрооборудования, неправильная или ложная работа дистанционной защиты, нарушение охранных зон линий электропередачи, а также неудовлетворительная организация выводов сетевого и генерирующего оборудования в ремонт.

Действия персонала в условиях аварийного режима устанавливаются Правительством РФ и определены в Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 854 "Об утверждении Правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике" [2]. В частности, пункт 24 предоставляет «субъекту оперативно-диспетчерского управления», т.е. оператору, право на самостоятельное принятие решения об изменении нагрузки электростанций или на «применение полного или частичного ограничения режима потребления электрической энергии (мощности)... в объемах, превышающих значения, предусмотренные графиками аварийного ограничения режима потребления электрической энергии...». Тем самым в экстренных ситуациях операторы, исходя из конкретных обстоятельств, могут действовать «не по инструкции» – с одной стороны, их действия способны предотвратить неблагоприятные последствия в порядке, не предусмотренным стандартным распоряжением, с другой – накладывают особую ответственность за принятие подобных решений.

Приказ Минэнерго России от 12.07.2018 N 548 «Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок...» [3] является нормативно-правовым актом, непосредственно регулирующим меры по предотвращению развития и ликвидации нарушений нормального режима. Предотвращение и ликвидация недопустимых частоты электрического тока, отклонений напряжения, перегрузки ЛЭП, равно как и ликвидация нарушений нормального режима при отключении ЛЭП – все действия субъектов оперативно-диспетчерского управления прописываются и утверждаются центром управления сетями сетевой организации (ЦУС) и диспетчерским центром субъекта оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике (ДЦ) для каждой станции или подстанции. Данный НПА содержит 2 приложения, представляющих собой таблицу допустимые в условиях эксплуатации кратковременных повышений напряжения для электрооборудования различных классов напряжения.

Примером практического средства анализа системных аварий в отечественной электроэнергетике служит режимный тренажер с контролем переключений РЕТРЕН (сокращение от РЕжимный ТРЕНажёр). Как указывают авторы исследования (Рабинович М.А., Гайснер, А.Д., Потапенко С.П., Коротков В.А.) «наличие в этом комплексе режимной и коммутационной моделей ЭЭС позволяет воспроизводить и анализировать широкий класс аварий в режиме, близком к реальному времени» [4, с. 350]. Комплекс КАСКАД-РЕТРЕН, основываясь на актах расследования аварий и нормативно справочной информации об энергосистеме, предназначен для использования в качестве режимного тренажёр и выполнения функции информационной поддержки оперативного персонала по мониторингу и ведению режима ЭЭС и энергообъединений. В 2012 году тренажёр был внедрён в производство и успешно функционирует в исполнительном аппарате ОАО «ФСК ЕЭС». Аварии в энергосистемах являются одним из видов техногенных катастроф, большое количество которых пришлось на 20 век. Это объясняется, в первую очередь, ведущей ролью электричества во всех процессах обеспечения человечества энергией. Проанализированные причины катастроф позволяют специалистам устранять недостатки в имеющихся энергосистемах, внедрять современное технологичное оборудование, разрабатывать новую техническую документацию и инструкции для технического персонала, а также проводить эффективное обучение и подготовку диспетчеров различных служб в сфере энергетики.

1. Пескароли Г; Александр Д (2015). "Определение каскадных катастроф и каскадных эффектов: выход за рамки метафоры "опрокидывания домино"". Планета@Риск, Глобальный форум в

- Давосе. 3 (1): 58-67. <https://www.semanticscholar.org/paper/A-definition-of-cascading-disasters-and-cascading-Pescaroli-Alexander/06074f128dfc90ea9adb5d54b629bcc586199089> (Дата обращения: 30.05.2021)
2. Постановление Правительства РФ от 27.12.2004 N 854 (ред. от 30.01.2021) "Об утверждении Правил оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике"
 3. Приказ Минэнерго России от 12.07.2018 N 548 (ред. от 13.02.2019) Об утверждении требований к обеспечению надежности электроэнергетических систем, надежности и безопасности объектов электроэнергетики и энергопринимающих установок Правила предотвращения развития и ликвидации нарушений нормального режима электрической части энергосистем и объектов электроэнергетики (Зарегистрировано в Минюсте России 20.08.2018 N 51938)
 4. Рабинович М.А., Гайснер А.Д., Потапенко С.П., Коротков В.А. Применение тренажёрного комплекса «РЕТРЕН» для анализа системных аварий в электроэнергетике // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики Иркутск, 01–07 июля 2018 года // 2018, с. 350-360
 5. Энергокризис случился из-за отключения на подстанции «Очаково». Lenta.ru (15 июня 2005) <https://lenta.ru/news/2005/06/15/chagino/> (Дата обращения: 30.05.2021)
 6. Энергетика работает с перенапряжением. Новая газета, 2 сентября 2009. <https://web.archive.org/web/20100213124713/http://www.novayagazeta.ru/data/2009/096/13.html> (Дата обращения: 30.05.2021)
-