

В. В. Павловский, д. т. н.; Н. В. Вишневский

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ФОРМИРОВАНИЮ АВТОМАТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТНОЙ РАЗГРУЗКИ В ЭНЕРГОСИСТЕМАХ

Проведен анализ подходов к формированию системы автоматической частотной разгрузки, рассмотрены требования действующих нормативных документов к автоматической частотной разгрузке. Проанализированы преимущества и недостатки подхода, учитывающего абсолютное значение частоты и скорость снижения частоты, подхода с использованием алгоритма оптимальной настройки системы АЧР, учитывающего структуру генерации и потребления, а также действующего подхода к формированию АЧР.

Ключевые слова: частота, автоматика частотной разгрузки, объединенная энергосистема Украины, моделирование, нагрузка, переходные процессы.

Введение

На сегодняшний день надежная эксплуатация объединенной энергосистемы (ОЭС) Украины невозможна без использования современных средств регулирования частоты и активной мощности. Такое регулирование может осуществляться как за счет управления генерацией при помощи системы автоматического регулирования частоты и активной мощности, работающей в нормальном и послеаварийном режимах, так и за счет управления объемом нагрузки автоматикой частотной разгрузки (АЧР), которая работает только в аварийных ситуациях.

Одной из основных проблем эксплуатации энергосистем является обеспечение ее надежной и устойчивой работы в аварийных режимах. Согласно выполненному анализу опыта других стран [1], возникновение наиболее тяжелых аварий обычно связано с потерей значительных объемов генерирующих мощностей или потерей связей района с большой нагрузкой. При этом наблюдают снижение частоты в дефицитных по генерации районах. Для предотвращения развития аварий, связанных с дефицитом активной мощности и снижением частоты, используют устройства АЧР.

В связи с чрезвычайной важностью работы АЧР при ликвидации аварийных режимов, которые сопровождаются снижением частоты, анализ подходов к формированию очередей АЧР в ОЭС Украины становится особенно актуальным.

Для проведения всестороннего анализа проблемы организации АЧР в ОЭС Украины в работе рассмотрены перспективный подход, который учитывает абсолютное значение частоты и скорость снижения частоты, метод с использованием алгоритма оптимальной настройки системы АЧР с учетом структуры генерации и потребления, а также действующий подход к формированию АЧР.

Перспективный подход к формированию АЧР, учитывающий абсолютное значение частоты и скорость снижения частоты

Подход, учитывающий абсолютное снижение частоты и скорость снижения частоты, активно предлагают для внедрения в ОЭС Украины в работах [1, 2]. По мнению его авторов, действующая система АЧР искусственно замедлена за счет большого количества очередей равномерно малого объема, поэтому, согласно [1, 2], существует опасность в обеспечении допустимых для АЭС уровней частоты в ОЭС Украины и, как следствие, возможность выделения реакторов АЭС на собственные нужды. Предложенный подход основывается на

распределении устройств АЧР, при системных дефицитах активной мощности должна срабатывать автоматическая частотная разгрузка по скорости снижения частоты, а при локальных местных дефицитах активной мощности должна срабатывать дополнительная автоматическая разгрузка.

На сегодняшний день в отраслевом нормативном документе [3] изложены требования к применению автоматической частотной разгрузки по скорости снижения частоты при системных дефицитах активной мощности, которые позволяют привести действующую систему АЧР в максимально эффективное состояние. Так, в нормативных требованиях, в частности, определяют граничные скорости снижения частоты и необходимость обоснованного подхода к внесению изменений в существующую систему АЧР. Согласно п. 9.1. документа [3], организацию АЧР-1С в целом для ОЭС Украины необходимо выполнять после создания специализированных программ для настройки и выбора уставок устройств АЧР-1С на основании расчетов длительных переходных процессов со снижением частоты при дефиците активной мощности и приобретении необходимого опыта внедрения устройств АЧР-1С в отдельных остродефицитных районах ОЭС Украины, в которых (при отсутствии АЧР-1С) в момент их выделения, как правило, невозможно существующими устройствами АЧР-1 обеспечить ликвидацию тяжелых частотных аварий и полного обесточения потребителей. Согласно п. 9.3., устройства АЧР-1С должны срабатывать с уставками при $f \leq 49,5$ Гц и скорости снижения частоты (далее - df/dt) $df/dt \geq 1,7$ Гц/с, с минимальной выдержкой времени $T = 0,15$ с для отстройки от кратковременных изменений частоты [3].

Следует отметить, что предложенное в работе [1] повышение нижних уставок АЧР с 47,2 Гц до 48 Гц может привести к ухудшению условий выделения блоков электростанций на районы со сбалансированной нагрузкой при снижении частоты до 47,5 Гц действием ЧДА-2 [3]. В случае, если генерация блока, который выделяется, меньше, чем нагрузка района, за счет нижних уставок АЧР (47,2-47,5 Гц) существует возможность отключения части нагрузки выделенного района при дальнейшем снижении частоты. Следовательно, существующие нижние очереди АЧР необходимы для дополнительного обеспечения успешного выделения блоков электростанций на район с частично сбалансированной нагрузкой вследствие медленного снижения частоты до 47,5 Гц.

Кроме того, расчеты, на которые ссылаются в работе [1], не учитывают новые технические возможности генераторов по участию в регулировании частоты, возникшие в результате их модернизации, которая проводится на электростанциях ОЭС Украины. Также необходимо отметить, что «укрупнение» очередей может привести к отключению больших объемов нагрузки и, как следствие, к значительному раскачиванию аварийного режима энергосистемы.

Метод формирования АЧР с использованием алгоритма оптимальной настройки системы АЧР с учетом структуры генерации и потребления

Метод с использованием алгоритма оптимальной настройки системы АЧР с учетом структуры генерации и потребления предлагают в работах [4, 5]. Формирование системы АЧР, в соответствии с [5], базируется на проведении анализа аварийных режимов (при нормальных и ремонтных схемах). Такие расчеты необходимо выполнять при структурных изменениях схемы, подключении новых потребителей или других изменениях, требующих проверки достаточности объема АЧР. Для проведения расчетов входными данными является перечень аварийных ситуаций, данные о размещении комплектов АЧР и уставки этих устройств. На первом этапе формируют перечень аварийных режимов. Сначала по результатам анализа всех аварийных режимов оценивают относительное влияние каждого

устройства АЧР. После дальнейших расчетов делают предположение, что искомые объемы АЧР принимают непрерывные значения в диапазоне от нуля до своего дискретного значения. По мнению авторов [5], такое предположение позволяет получить не только оптимальный объем разгрузки всей энергосистемы, но и определить, какой объем разгрузки необходим от каждого устройства АЧР с учетом его места в топологии схемы. Далее выполняют поиск районов, не имеющих минимально необходимого объема активной мощности для разгрузки. Анализ дефицитных по разгрузке районов необходим для принятия решения о дополнении объема разгрузки или игнорировании таких аварийных ситуаций как маловероятных. На втором этапе проводят определение набора нагрузок для покрытия дефицита активной мощности всех аварийных ситуаций таким образом, чтобы было задействовано их минимальное количество. В результате проведения комплекса расчетов определяют значительность каждого устройства АЧР для дефицитного района, то есть на основании анализа определяют участие комплектов АЧР в ликвидации локальных аварийных ситуаций. Если не были найдены локальные аварийные ситуации для срабатывания комплекта АЧР, делают вывод о его ненужности. На этом же принципе проверяют наличие минимально необходимого объема разгрузки для покрытия дефицита активной мощности для каждого дефицитного района.

Недостатком такого подхода является то, что перечень аварийных ситуаций подбирают статистически и при помощи экспертного анализа. Это значительно уменьшает объем расчетов, однако может привести к ошибочным результатам, поскольку не охватывает все множество возможных аварийных ситуаций. В конце первого этапа перечень аварийных ситуаций дополнительно ограничивается за счет игнорирования части аварийных ситуаций как маловероятных, что также снижает надежность результатов.

Метод формирования АЧР, используемый в ОЭС Украины

Согласно п. 6.1.1. [3], АЧР предназначена для предотвращения опасного снижения частоты в случае возникновения дефицита активной мощности в ОЭС Украины или ее отдельной части путем отключения части нагрузки потребителей. Отключение потребителей необходимо проводить небольшими очередями при медленном снижении частоты. В настоящее время критической принята скорость снижения частоты более 1,7 Гц/с, однако рекомендации по определению критической скорости снижения частоты должны быть определены специальной методикой на основании масштабных расчетных экспериментов на качественной математической модели энергосистемы.

Работа по формированию методики определения критической скорости снижения частоты, а также настройки и выбора уставок устройств АЧР, реагирующих на скорость снижения частоты, в планах научно-технического центра электроэнергетики.

Согласно «Инструкции о составлении и применении графиков ограничения и аварийного отключения потребителей, а также противоаварийных систем снижения электропотребления» [6], АЧР разрабатывают, применяют, пересматривают согласно «Правилам применения системной противоаварийной автоматики предотвращения и ликвидации опасного снижения или повышения частоты в энергосистемах» [3]. В таблицах 1 – 2 приведена действующая структура АЧР в процентах и в нагрузках прошлого года.

Таблица 1

Распределение нагрузки в ОЭС Украины, которую отключают под действием АЧР-1 (САЧР, ЗАЧР и основной очереди АЧР-1), в зависимости от уставки и частоты

№ п/п	Частота срабатывания	Мощность нагрузки, которую отключают, МВт	Доля нагрузки, которую отключают, %
1.	49,2	1130,4	10,81
2.	49,1	1108,2	10,60
3.	48,6	482,8	4,62
4.	48,5	445,5	4,26
5.	48,4	391,4	3,74
6.	48,3	465,9	4,46
7.	48,2	440,1	4,21
8.	48,1	411,8	3,94
9.	48	510,8	4,89
10.	47,9	512,8	4,91
11.	47,8	554,6	5,31
12.	47,7	496,0	4,74
13.	47,6	524,5	5,02
14.	47,5	611,2	5,85
15.	47,4	445,1	4,26
16.	47,3	431,1	4,12
17.	47,2	365,2	3,49
Всего:		10453,6	100

Таблица 2

Распределение нагрузки в ОЭС Украины, которую отключают действием АЧР-2 (совмещенной), в зависимости от уставки по частоте

№ п/п	Частота срабатывания	Мощность нагрузки, которую отключают, МВт	Доля нагрузки, которую отключают, %
1.	49	1643,4	21,1
2.	48,9	1696,0	21,8
3.	48,8	2426,5	31,2
4.	48,7	2012,4	25,9
Всего:		7778,3	100

Графическое отображение нагрузки, которая отключается действием АЧР-1 в ОЭС Украины, приведено на рис. 1.



Рис. 1. Графическое отображение нагрузки в ОЭС Украины, которую отключают действием АЧР-1:
а) в абсолютных единицах; б) в процентном соотношении

В настоящее время просмотр уставок АЧР происходит раз в год, согласно ежегодному «Решению о принципах формирования системы АЧР-ЧАПВ в ОЭС Украины на осенне-зимний максимум». Согласно решению, для каждой из энергосистем устанавливают объем нагрузки, который должен быть заведен под действие АЧР, в процентах от общего потребления для каждой очереди. Таким образом, объемы нагрузки, заведенной под АЧР, ежегодно пересматривают и корректируют в соответствии с требованиями действующих нормативных документов [3]. Принято считать, что такой подход обеспечивает эффективную работу АЧР, а именно: предотвращает снижение частоты ниже соответствующего уровня более допустимого времени и позволяет автоматически восстановить нормальную работу энергосистемы.

Выводы

Каждый из рассмотренных методов формирования АЧР имеет определенные преимущества и недостатки. Основным недостатком метода, учитывающего абсолютное значение частоты и скорость снижения частоты, является потеря гибкости из-за укрупнения очередей по сравнению с существующей. Кроме того, повышение уставок нижних очередей выше уровня ЧДА-2 может ухудшить условия выделения блоков электростанций на районы с частично сбалансированной нагрузкой. Метод с использованием алгоритма оптимальной настройки системы АЧР с учетом структуры генерации и потребления не рассматривает всё возможное множество аварийных ситуаций и может быть полезным только для исследования небольших энергорайонов.

Проведенный анализ показал, что ни один из предлагаемых методов не учитывает перспективные и уже выполненные замены оборудования электростанций, которое принимает участие в регулировании частоты и которое необходимо учитывать при вычислении длительных переходных процессов.

Для качественного исследования целесообразности внесения изменений в существующую систему формирования АЧР необходимо проведение масштабных расчетных исследований длительных переходных процессов в ОЭС Украины с учетом моделирования комплектов АЧР и учетом оборудования, которое участвует в регулировании частоты. Это требует применения детализированной качественной модели и современных программных комплексов.

Стоит отметить, что все рассмотренные методы при выполнении расчетов не учитывают существующие в ОЭС Украины ограничения перетоков мощности по контролируемым сечениям, и следовательно, не учитывают возможность нарушения устойчивости режимов при изменении потокораспределения вследствие работы АЧР при снижении частоты. Последнее может привести к дополнительному развитию аварий при работе АЧР, связанных с потерей статической устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данильчук В. Н. Автоматика ограничения изменения частоты энергосистем / В. Н. Данильчук. – К., 2014. – 439 с.
2. Данильчук В. Н. Новые технические аргументы необходимости реформирования системы АЧР энергосистемы / В. Н. Данильчук, Е. А. Коломиец // Энергетика та електрифікація : науково-виробничий журнал. – 2009. – № 10. – С. 40 – 47.
3. Наказ «Про затвердження Правил застосування системної протиаварійної автоматики запобігання та ліквідації небезпечного зниження або підвищення частоти в енергосистемах» [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z1177-03>.

4. Литвинчук В. А. О стратегии настройки системы автоматической частотной нагрузки энергосистем / В. А. Литвинчук, В. П. Яновский, Н. И. Каплин // Энергетика и электрификация. – 2005. – № 8. – С. 25 – 31.
5. Литвинчук В. А. Передбачення аварій з дефіцитом активної потужності в енергосистемах / В. А. Литвинчук // Энергетика и электрификация. – 2004. – № 6. – С. 29 – 32.
6. Наказ «Про затвердження Інструкції про складання і застосування графіків обмеження та аварійного відключення споживачів, а також протиаварійних систем зниження електроспоживання» [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://zakon5.rada.gov.ua/laws/show/z0151-07>.

Павловский Всеволод Витальевич – д. т. н., ведущий научный сотрудник.
Институт электродинамики Национальной академии наук Украины.

Вишневский Никита Владимирович – заместитель начальника службы оптимизации электрических режимов, e-mail: n0509652592@gmail.com.
Государственное предприятие «Национальная энергетическая компания «Укрэнерго».