

Создание программируемой автоматической частотной разгрузки на базе технологии SMART GRID

А.Ю. Арестова, К.С. Савенкова
ФГБОУ ВПО НГТУ, Новосибирск, Россия

Аннотация. В статье рассмотрена возможность использования отдельных функциональных свойств технологии Smart Grid для создания программируемой АЧР для уменьшения объемов отключаемой мощности нагрузки. Дано сравнение алгоритма действия программируемой и традиционной АЧР для конкретной схемы электрической сети, на основе которого сделаны выводы об эффективности разрабатываемой автоматики

Ключевые слова: частота, АЧР, автоматика, отключение потребителей, потери мощности, Smart Grid.

ВВЕДЕНИЕ

Наиболее тяжелые последствия для энергосистемы происходят при системных авариях с возникновением большого дефицита генерируемой активной мощности и глубоким снижением частоты. При дефиците активной мощности в энергосистеме частота снижается до тех пор, пока снова не наступит равенство потребляемой и генерируемой мощностей. При длительной работе с пониженной частотой в процессе частотной аварии снижается скорость вращения генераторов, что приводит к снижению вырабатываемой ими мощности и их ЭДС. При этом может возникнуть явление лавины частоты, что, в свою очередь, приведет к полному погашению дефицитной части энергосистемы с остановом всех ее электростанций и перерывом энергоснабжения потребителей. Для предотвращения и ограничения последствий таких аварий применяется комплекс автоматики ограничения снижения частоты (АОСЧ), а именно его основная составляющая – автоматическая частотная разгрузка (АЧР). Ее назначение – отключение части менее ответственных потребителей при дефицитах активной мощности в энергосистеме с аварийными уровнями снижения частоты.

Устройства АЧР должны удовлетворять ряду требований:

1. Обеспечение нормальной работы энергосистемы независимо от дефицита активной мощности, характера причин, вызывающих снижение частоты; не допускать даже кратковременного снижения частоты ниже $f = 45 \text{ Гц}$; продолжительность работы с частотой

$f < 47 \text{ Гц}$ не должна превышать 20 с, а с частотой $f < 48,5 \text{ Гц}$ – 60 с (Рис. 1).

2. Обеспечение отключения потребителей в соответствии с возникшим дефицитом мощности; при этом последовательность отключений должна быть такая, чтобы в первую очередь отключались менее ответственные потребители; восстановление частоты до уровня, при котором энергосистема может длительно работать.

3. Если восстановление нормального режима после АЧР возлагается на устройства автоматики, то УАЧР должны обеспечить подъем частоты до уровня, необходимого для их срабатывания.

4. Действовать согласованно с устройствами АПВ и АВР.

5. Не действовать при кратковременных снижениях частоты.

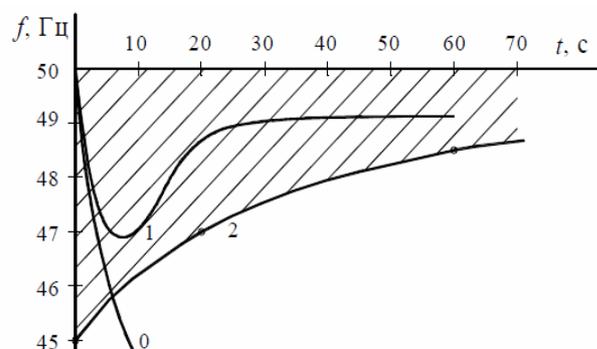


Рис. 1. Отклонение частоты [1]: 0 – без действия автоматики, 1 – восстановление частоты при работе АЧР, 2 – граница допустимой зоны отклонения

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе внедрения АЧР применялось небольшое число очередей (4-5), мощность каждой из которых выбиралась таким образом, чтобы восстановить частоту от значения уставки этой очереди до частоты, близкой к номинальной. При этом выдвигалось требование к обеспечению селективности очередей. Величина отключаемой каждой очередью нагрузки и ступени по частоте между ними получались большими, что, в условиях многообразия возможных значений аварийного дефицита, приводило, в одних случаях, к излишнему отключению потребителей, а в других – к не довосстановлению величины частоты до номинальной. Такой алгоритм работы

не удовлетворял основному требованию, предъявляемому этой автоматике – самонастраиваемости с точки зрения объема отключаемой нагрузки [2].

В настоящее время используется структура АЧР, которая позволяет замедлять падение частоты и восстанавливать ее путем последовательного отключения необходимого числа малых объемов нагрузки (ступеней) с разделением их на последовательные категории (очереди). Очереди разделены по своим функциям:

1. АЧР1 – быстродействующая АЧР, предназначена для прекращения процесса снижения частоты;

2. АЧР2 несовмещенная (действует на выделенный объем мощностей нагрузки потребителей) – для подъема частоты после действия устройств АЧР1, а также при медленном снижении частоты;

3. АЧР2 совмещенная (действует на объем мощности нагрузки потребителей, подключенных к АЧР1) – для предотвращения зависания частоты на недопустимо низком уровне.

Суммарная мощность подключенной к АЧР нагрузки должна быть не менее 60 % от потребления. Мощность нагрузки, подключенной к совмещенной АЧР2, не учитывается в суммарной мощности АЧР, поскольку ее действие осуществляется вторым (резервным) пуском на отключение нагрузки, подключенной к АЧР1.

На рисунке 2 представлен график работы 1 и 2 очередей АЧР. Кривая 0 соответствует снижению частоты в аварийных условиях без действия АЧР, кривые 1 – 3 обозначают срабатывание ступеней 2 очереди АЧР.

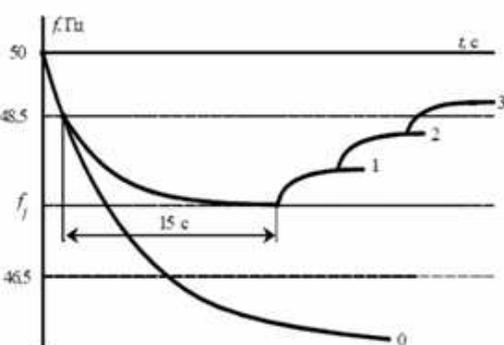


Рис. 2. График работы 1 и 2 очередей АЧР [1]

Эта структура сделала систему разгрузки более гибкой – работа автоматики приводит к восстановлению частоты до значения, максимально близкого к номинальному. Тем не менее, она не позволяет расставлять приоритеты в отключении той или иной нагрузки в рамках одной ступени.

Идея интеллектуальной АЧР основана на разделении отключаемых потребителей на более/менее предпочтительных с точки зрения отключения. Необходимо отметить, что новый

алгоритм никак не меняет принципиальный состав отключаемых потребителей, изменению подвержена лишь очередность их отключения в масштабе одной очереди. Категории потребителей изменению не подвержены.

Таким образом, большей эффективности АЧР можно достичь, если для каждой ступени учесть вклад отключаемого потребителя в снижении потерь активной мощности в электрической сети. Уменьшение потерь, в свою очередь, приведет к косвенному уменьшению аварийного дефицита мощности. Расчет доли электрических потерь в ЛЭП и в трансформаторах от каждой конкретной нагрузки принято производить на основе принципа адресности [3]. Осуществить это возможно, используя за основу технологический базис *Smart Grid*.

В России технология *Smart Grid* выступает в качестве концепции интеллектуальной активно-адаптивной сети. Одной из главных особенностей интеллектуальных сетей является способность к самовосстановлению при аварийных ситуациях. Элементы энергосистемы должны постоянно поддерживать свое техническое состояние на уровне, обеспечивающем требуемую надежность и качество электроснабжения путем перехода от управления по факту возникновения ситуации к управлению, предупреждающему ее появление. Самовосстанавливающаяся энергосистема должна стремиться минимизировать возмущения и их последствия с помощью разветвленных систем сбора данных и «умных» устройств, реализующих специальные алгоритмы принятия решений, которые основаны, в первую очередь, на распределенных принципах управления.

Диагностика состояния оборудования и оценка вероятных рисков его отказа основывается на измерениях, производимых в режиме реального времени на оборудовании электростанций, подстанций и линиях электропередачи. При этом под приоритетным контролем оказываются элементы системы, имеющие наибольшую вероятность отказа, а также те элементы, выход из строя которых может привести к тяжелым последствиям для всей системы.

Анализ последствий аварий, возможных при данном режиме работы, производимый в режиме реального времени, в энергосистеме на базе концепции *Smart Grid* определяет общее состояние сети, позволяет своевременно спрогнозировать возможные отказы и вырабатывает список необходимых незамедлительных действий оперативно-диспетчерского персонала, формирует и выполняет команды управления для исполнительных механизмов электро-энергетической системы. Кроме того, интеграция распределенных энергоресурсов увеличивает устойчивость всей системы, поскольку обеспечивает большее количество источников электроэнергии и позволяет, при необходимости,

создавать изолированные энергосистемы.

Оснащенность современными устройствами учета и контроля позволит сократить и предотвратить перебои, а также продлить срок службы подстанционного и распределительного оборудования [4].

Разработка алгоритма интеллектуальной АЧР была проведена на базе ПО *WinLoadFlow*, разработанного на кафедре АЭС НГТУ. Программа позволяет рассчитать нормальный режим работы электрической сети, а также дает количественную оценку электрических потерь в ветвях схемы, вносимых каждой конкретной нагрузкой в сети.

Для реализации алгоритмов АЧР была разработана математическая модель электрической сети номинальным напряжением 6-500 кВ, включающая 30 узлов и 27 ветвей. Был произведен множественный расчет установившихся режимов, моделирующий изменение суммарной потребляемой мощности энергосистемы на величину мощности одной очереди, определяемую по формуле:

$$P_{отк} = (50 - f) \cdot k_{р.э.н} \cdot \frac{P_{нагр}}{50}, \quad (1)$$

где $k_{р.э.н}$ - регулирующий эффект нагрузки, $P_{н.ном}$ - мощность нагрузки системы при $f = 50$ Гц, f - величина, до которой упало значение частоты [5]. В соответствии с типовой структурой настройки АЧР [6] после срабатывания каждой ступени отключения нагрузки происходит возврат частоты на 0,1 Гц. Это значит, что каждая ступень одновременно отключает по:

$$\frac{3,636 \cdot 0,1}{0,5} = 0,727 \text{ MВт}.$$

Рассмотрим алгоритм работы традиционной АЧР в электрической сети, схема которой представлена на рис. 3. В качестве допущения примем, что все нагрузочные узлы относятся к одной категории потребителей (третьей). В распределительной сети имеется 10 потребителей (узлы 2, 4, 6, 8, 10, 22, 26, 28, 30, 34 на Рис. 3). Следовательно, все нагрузочные узлы имеют одинаковый приоритет по очередности отключения. Определим величину активной мощности, которую необходимо отключить при снижении частоты до 48 Гц по формуле (1):

$$k_{р.э.н} = 2, P_{нагр} = 181,78 \text{ MВт}, f = 48 \text{ Гц}$$

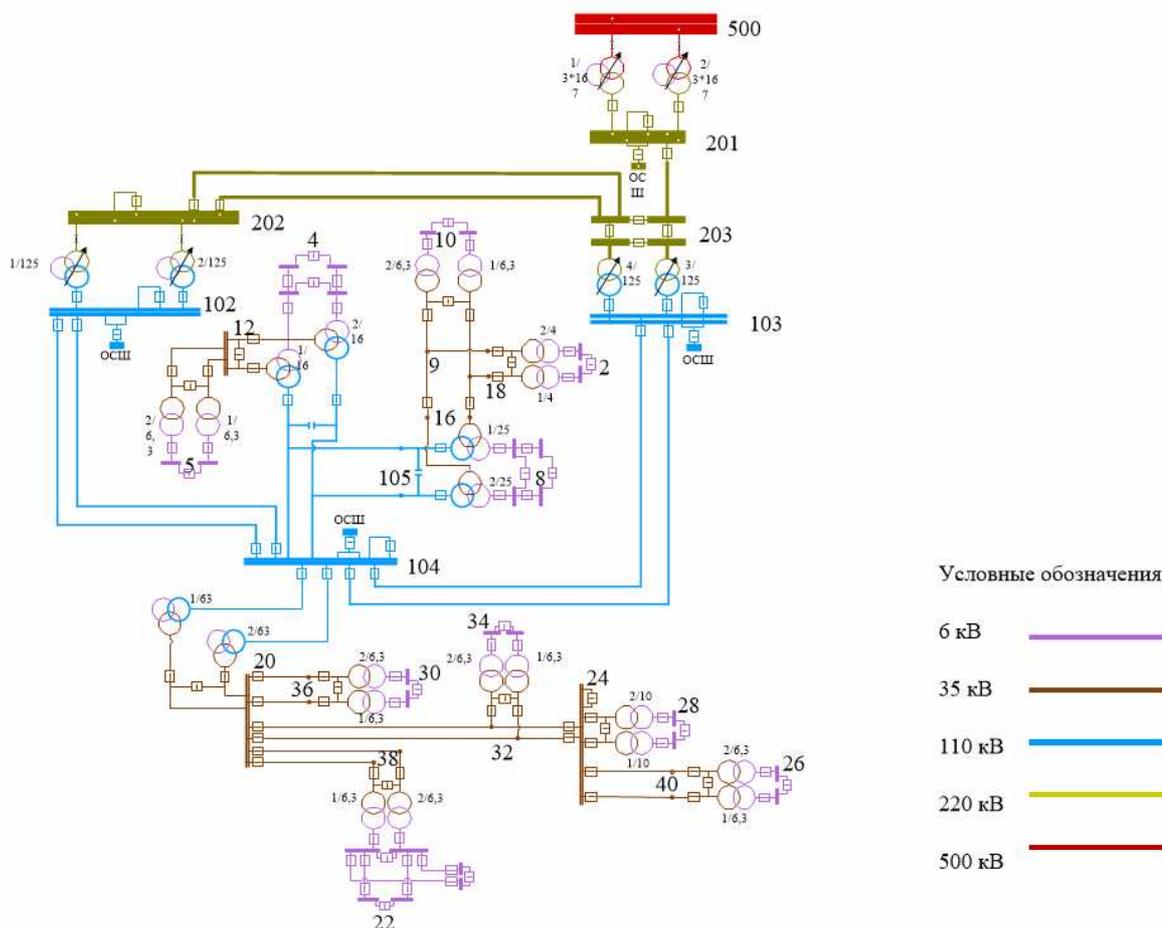


Рис. 3. Схема электрической сети

$$P_{отк} = (50 - 48) \cdot 2 \cdot \frac{181,78}{50} = 14,54 \text{ MВт}$$

Дефицит активной мощности составил 8% от суммарного потребления. При регулирующем эффекте нагрузки равном 2 на каждые 3,636 MВт дефицита активной мощности приходится снижение частоты на 0,5 Гц согласно формуле (2):

$$k_{p,эл} = \frac{\Delta P_{нагр} (\%)}{\Delta f (\%)} \quad (2)$$

Для восстановления частоты до номинального значения потребуется отключить

$$\frac{50 - 48}{0,1} = 20$$

ступеней. Традиционная АЧР не имеет определенного порядка для отключения потребителей (помимо их разделения по категориям надежности электроснабжения), поэтому произойдет поочередное отключение ступеней от каждого потребителя до полного восстановления частоты. Так как при снижении частоты на 2 Гц будет задействовано 20 очередей, то произойдет отключение двух очередей от каждого потребителя.

Рассмотрим работу программируемой АЧР. Основная суть алгоритма автоматической частотной разгрузки на базе технологии *Smart Grid* состоит в том, что программное обеспечение, которым оснащена энергосистема, производит выбор соответствующей ветви в электрической сети с максимальными потерями, затем, основываясь на принципе адресности, выясняет, какая именно нагрузка создает потери в выбранной ветви, и производит отключение этой нагрузки с целью не только замедлить падение частоты, но и уменьшить потери мощности.

После этого расчет режима необходимо повторить. Суммарное потребление, за счет уже совершенного отключения, уменьшилось, а, значит, уменьшилась и расчетная величина отключаемой последующей очередью АЧР мощности. Процесс поэтапного расчета установившегося режима продолжается до полного восстановления частоты в энергосистеме – в данном конкретном случае, до срабатывания 20-ой ступени.

Расчет режима и определение объема отключения каждой ступени АЧР необходимо проводить в режиме реального времени, что не вызывает сложности на базе технологий *Smart Grid*.

При работе АЧР без специального алгоритма произойдет отключение от каждой нагрузки по $0,727 \cdot 2 = 1,454 \text{ MВт}$.

Алгоритм работы программируемой АЧР представлен в *Таблице*. Алгоритм предполагает

изменение суммарной мощности нагрузки потребителей ($P_{нагр}$), величины дефицита частоты (Δf), расчетного значения отключаемой каждой ступенью мощности ($P_{отк.ст}$) и нагрузочных потерь активной мощности в ветвях энергосистемы (ΔP) в ходе восстановления частоты.

Выбор отключаемой нагрузки происходит на основе анализа нагрузочных потерь, вызываемых отдельными потребителями в сети электроснабжения. Наибольшие потери в линиях и трансформаторах вызывали наиболее отдаленные нагрузки (узлы 22, 28, 34), вследствие чего в процессе работы АЧР именно они были выбраны для отключения. После восстановления частоты до 50 Гц работой программируемой АЧР, итоговый объем отключенной мощности нагрузки уменьшился на 2 MВт по сравнению с работой непрограммируемой АЧР, что составило 9,2% от общего объема отключения.

Заметим, что действие АЧР не предусматривает восстановление частоты именно до 50 Гц, как показано в рассматриваемом примере. Достаточным считается подъем частоты до длительно-допустимого диапазона (49,2–50 Гц).

Таблица

Алгоритм работы программируемой АЧР

$P_{нагр}, \text{ MВт}$	$\Delta f, \text{ Гц}$	$P_{отк.ст}, \text{ MВт}$	$\Delta P, \text{ MВт}$
181,78	48	0,73	5,42
180,93	48,1	0,72	5,31
180,10	48,2	0,72	5,20
179,28	48,3	0,72	5,10
178,46	48,4	0,71	5,00
177,65	48,5	0,71	4,91
176,85	48,6	0,71	4,81
176,04	48,7	0,70	4,71
175,24	48,8	0,70	4,62
174,45	48,9	0,70	4,53
173,68	49	0,70	4,45
172,89	49,1	0,69	4,36
172,12	49,2	0,69	4,28
171,36	49,3	0,69	4,21
170,61	49,4	0,68	4,14
169,87	49,5	0,68	4,08
169,11	49,6	0,68	4,00
168,36	49,7	0,67	3,93
167,62	49,8	0,67	3,86
166,88	49,9	0,67	3,79
$P_{нагр.итог} = 166,14$		$P_{отк\Sigma} = 13,21$	

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оптимизируя существующие методы управления режимами энергосистем, можно увеличить их эффективность без значительных капиталовложений в новые технологии производства, передачи и распределения энергии. Модернизируя существующую энергосистему до интеллектуальной, активно-адаптивной сети, можно создать полностью интегрированную систему, начиная от производства и передачи, заканчивая распределением и потреблением электричества частными пользователями.

На данном этапе разработки алгоритма интеллектуальной АЧР можно сделать вывод, что, учитывая только взаимное влияние элементов SmartGrid и их расположение, можно значительно уменьшить объемы отключаемой для ликвидации частотной аварии нагрузки. Снижение числа излишних отключений для достижения того же эффекта (восстановление частоты до номинальной), в свою очередь, приведет к снижению потерь прибыли для собственников субъектов электроэнергетики, а, значит, и к повышению эффективности методов управления режимами энергосистем.

Исследование алгоритма необходимо продолжить с использованием промышленных программных комплексов, а также автоматизации процесса расчета.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Павлов Г.М., Меркурьев Г.В. Автоматика энергосистем / Г.М. Павлов, Г.В. Меркурьев. – СПб, 2001. – с. 271-299
- [2] Данильчук В.Н. Автоматика ограничения изменений частоты энергосистем: практическое пособие по обслуживанию частотных автоматик, блокировок и защит / В.Н. Данильчук. – Киев, 2014. – с. 128-156
- [3] Русина А.Г. Развитие теории и методологии анализа электроэнергетических систем для управления установившимися режимами: дис. докт. техн. наук: 05.14.02 – Томск, 2013. – 297 с.
- [4] Кобец Б. Б., Волкова И. О. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid / Б. Б. Кобец, И. О. Волкова – М.: ИАЦ Энергия, 2010. – с. 10-125.
- [5] Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения: Учебник для ВУЗов / В.А. Андреев. – 5-е изд., стер. – М.: Высшая школа, 2007. – с. 370-382.
- [6] Стандарт организации ОАО «СО ЕЭС»: СТО 59012820.29.240.001-2010. Технические правила организации в ЕЭС России автоматического ограничения снижения частоты при аварийном дефиците активной мощности (автоматическая частотная разгрузка). М., 2009 г. – с. 11-15.



Анна Юрьевна Арестова – старший преподаватель кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем факультета Энергетики НГТУ
E-mail: ann.arestova@gmail.com



Кристина Сергеевна Савенкова – магистрант кафедры Автоматизированных электроэнергетических систем факультета Энергетики НГТУ
E-mail: savenkova.kriss@gmail.com

Development of Algorithm of Programmable Automatic Frequency Load Shedding Based on the Smart Grid Technology

Anna Arestova, Kristina Savenkova

Abstract. The paper describes the possibility of utilization of certain functional properties of Smart Grid technology to create a programmable automatic load shedding. This will lead to reducing the volume of switched active load. The comparison of two algorithms: the programmed and traditional automatic load shedding is presented in the paper. The specific design of the electrical network has been examined for these purposes. Some conclusions are given about the effectiveness of the developed algorithm.

Key words: frequency, automatic frequency load shedding, power losses, Smart Grid.

REFERENCES

- [1] Pavlov G.M., Merkur'ev G.V. Avtomatika jenergosistem / G.M. Pavlov, G.V. Merkur'ev. – SPb, 2001. – s. 271-299
- [2] Danil'chuk V.N. Avtomatika ogranichenija izmenenij chastoty jenergosistem: prakticheskoe posobie po obsluzhivaniju chastotnyh avtomatik, blokirovok i zashhit / V.N. Danil'chuk. – Kiev, 2014. – s. 128-156
- [3] Rusina A.G. Razvitie teorii i metodologii analiza jelektrojenergeticheskikh sistem dlja upravlenija ustanovivshimisja rezhimami: dis. dokt. tehn. nauk: 05.14.02 – Tomsk, 2013. – 297 s.
- [4] Kobec B. B., Volkova I. O. Innovacionnoe razvitie jelektrojenergetiki na baze koncepcii Smart Grid / B. B. Kobec, I. O. Volkova – M.: IAC Jenergija, 2010. – s. 10-125.
- [5] Andreev V.A. Relejnaja zashhita i avtomatika sistem jelektrosnabzhenija: Uchebnik dlja VUZov / V.A. Andreev. – 5-e izd., ster. – M.: Vysshaja shkola, 2007. – s. 370-382.
- [6] Standart organizacii OAO «SO EJeS»: SТО 59012820.29.240.001-2010. Tehnicheskie pravila organizacii v EJeS Rossii avtomaticheskogo ogranichenija snizhenija chastoty pri avarijnom deficite aktivnoj moshhnosti (avtomaticheskaja razgruzka). M., 2009 g. – s. 11-15.