ПОСЛЕАВАРИЙНОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ

АВТОРЫ:

Ю.Я. ЛЮБАРСКИЙ,
Д.Т.Н.,
АО «НТЦ ФСК ЕЭС»

Н.М. АЛЕКСАНДРОВ,
НПП «ДИНАМИКА»
(Г. ЧЕБОКСАРЫ)

П.С. РАДИН,
ЮЖНО-ЯКУТСКИЙ РЭС
ФИЛИАЛА ПАО «ФСК
ЕЭС» МЭС ВОСТОКА

Аварийная ситуация в электрических сетях является одним из самых сложных состояний сети. В настоящее время восстановление работоспособности сети осуществляется вручную диспетчерским персоналом. При этом «человеческие» ошибки персонала могут приводить к весьма тяжелым последствиям. Использование современных интеллектуальных систем позволит формировать стратегии восстановления в автоматическом режиме.

Ключевые слова: планирование послеаварийного восстановления; интеллектуальные системы.

Аварии в электрических сетях чреваты значительными финансовыми потерями. Минимизация таких потерь подразумевает сокращение времени послеаварийных работ

ВВЕДЕНИЕ

Автоматизация диспетчерского управления энергосистемами должна содержать средства для автоматизации послеаварийного управления, которое является одной из важнейших задач. Актуальность этой задачи подтверждается случаями сложных каскадных аварий в отечественных энергосистемах.

В общем случае после аварии образуется «архипелаг» из отделившихся от Единой энергосистемы «островов» — районов. Необходимо определить план восстановления для максимально возможного удовлетворения требований потребителя при минимизации потерь.

В настоящее время практически отсутствуют универсальные программные средства для формирования плана восстановления. Поэтому в аварийных ситуациях восстановление осуществляется практически вручную диспетчерским персоналом. При этом «человеческие» ошибки могут приводить к тяжелым последствиям. Использование интеллектуальных систем (экспертные системы, программы-рассуждения) позволит формировать такие планы автоматически. Вместо традиционных программных методов в подобных системах используется система правил, формулируемых на естественном языке специалиста-технолога.

ПЛАНИРОВАНИЕ ПОСЛЕАВАРИЙНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ

План восстановления целесообразно разрабатывать в рамках интеллектуальной автоматической системы диспетчерского управления (АСДУ) на двух уровнях:

1. системный уровень — план действий с оборудованием электроэнергетической системы (ЭЭС);
2. коммутационный уровень — план переключений коммутационных элементов.

СИСТЕМНЫЙ УРОВЕНЬ

В литературе [1, 2] отмечается сложность задачи планирования восстановления, отсутствие универсального алгоритма. Относи-

ОБЩИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

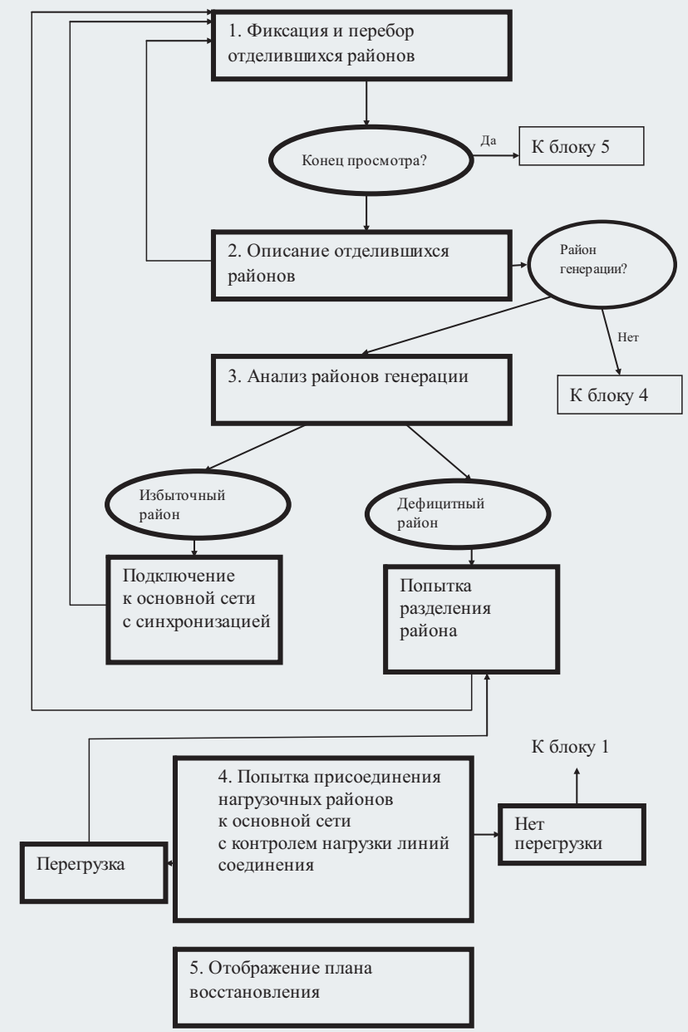

Рис. 1

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ СЕМАНТИЧЕСКАЯ СТРУКТУРА ДЛЯ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ

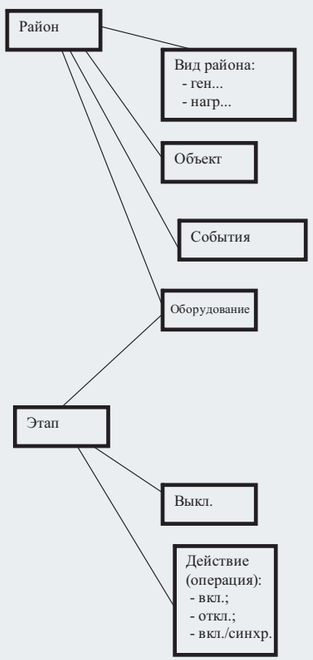

Рис. 2

тельно легко построить систему для планирования этого процесса можно на основе применения экспертных систем и программ-рассуждений [5, 6]. Существенно, что при этом, благодаря применению эвристических правил, можно обеспечить простую модификацию системы при необходимости учета дополнительных параметров и операций. Общий алгоритм выработки плана восстановления приведен на рис. 1 на с. 53. Алгоритм дан упрощенно, в частности, нет указания на операции с генераторами в избыточных районах.

Программа «Восстановление», реализующая этот алгоритм, является частью подсистемы SmartCom комплекса «Советчик диспетчера». Программа предназначена для:

- выявления районов, отделившихся от основной сети;
- формирования описания отделившихся районов;
- формирования плана послеаварийного восстановления.

Структура знаний для задачи содержит понятия, необходимые для описания энергосистемы (объекты, виды объектов, оборудование, виды оборудования, коммутационные аппараты, виды и положения коммутационных аппаратов, электрические узлы сети, уровни напряжения [5]). Для решения задачи восстановления эта структура дополняется семантической структурой, показанной на рис. 2.

Для определения отделившихся районов и их связей используются вопросы, выявляющие связи элементов оборудования через электрические узлы и коммутационные аппараты. Работа алгоритма иллюстрируется на примере фрагмента схемы сети 500 кВ ОЭС Центра (рис. 3). Схема используется при условном задании параметров — генераций и нагрузок. На рис. 3 энергообъекты отделившегося района отмечены цветом. Схема подстанции (ПС) «Липецкая» в примере разделена отключением шиносоединительных выключателей. Отключенные воздушные линии (ВЛ) показаны пунктиром.

Приведем пример протокола работы системы при формировании плана по алгоритму рис. 1. При рассмотрении протокола следует иметь в виду, что он описывает многоэтапный процесс, а выявленные отделившиеся районы на каждом этапе перенумеровываются.

Упрощенный протокол работы алгоритма имеет следующий вид:

ОТДЕЛЕНИЕ от ЕЭС
--- Район 1---
Липецкая -- схема объекта разделена с ЕЭС
Борино
Елецкая
--- Описание района 1 ---
Липецкая -- схема объекта разделена с ЕЭС
Борино
Елецкая
--Связи района с ЕЭС через выключатели Липецкая
--Линии для связи района с ЕЭС
ВЛ 500 кВ НВАЭС — Борино
ВЛ 500 кВ Новобрянская — Елецкая

При присоединении района 1 к ЕЭС возможна перегрузка линии
ВЛ 500 кВ Новобрянская — Елецкая
[Комментарий: система пробует присоединить отделившийся район к ЕЭС. Выявляется возможная перегрузка линии. Тогда система пробует разделить отделившийся район и присоединять его части к ЕЭС поочередно.]
Попытка разделения района 1
--ОТКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
--ОТКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Борино — Елецкая

ОТДЕЛЕНИЕ от ЕЭС
--- Район 1 ---
Елецкая
--- Район 2 ---
Липецкая -- схема объекта разделена с ЕЭС
--- Район 3 ---
Борино
--- Описание района 1 ---
Елецкая
--Линии для связи района с ЕЭС
ВЛ 500 кВ Новобрянская — Елецкая
--Линии для связи Района 1 с Районом 3
ВЛ 500 кВ Борино — Елецкая
--Нет станций в районе 1
Елецкая
--- Описание района 2 ---
Липецкая
--Линии для связи района с ЕЭС
ВЛ 500 кВ Липецк — Тамбов
ВЛ 500 кВ Балашовская зап. с отп.
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
--Линии для связи Района 2 с Районом 3
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
--Нет станций в районе 2
Липецкая
--- Описание района 3 ---
Борино
--Линии для связи района с ЕЭС
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
ВЛ 500 кВ НВАЭС — Борино
--Линии для связи Района 3 с Районом 1
ВЛ 500 кВ Борино — Елецкая
--Линии для связи Района 3 с Районом 2
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
--Нет станций в районе 3

Для присоединения района 1 к ЕЭС
--ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Новобрянская — Елецкая
Для присоединения района 2 к ЕЭС
--ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Балашовская зап. с отп.
Для присоединения района 3 к ЕЭС
--ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ НВАЭС — Борино

Нет отделений от ЕЭС
[Комментарий: отображается сформированный интеллектуальной системой окончательный план восстановления.]

ПЛАН ВОССТАНОВЛЕНИЯ:
--- 1. ОТКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
--- 2. ОТКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Борино — Елецкая
--- 3. ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Новобрянская — Елецкая
--- 4. ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Балашовская зап. с отп.
--- 5. ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ НВАЭС — Борино
--- 6. ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Липецк — Борино
--- 7. ВКЛЮЧИТЬ
ВЛ 500 кВ Борино — Елецкая

ОТДЕЛЕНИЕ РАЙОНА В СТРУКТУРЕ СЕТИ 500 КВ ОЭС ЦЕНТРА

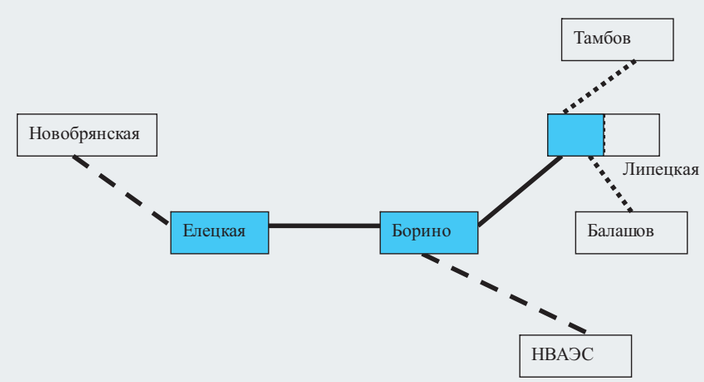

Рис. 3

Полученный план восстановления должен быть (поэтапно) проверен на режимной модели (например, см. [6]) для выявления возможных недопустимых значений параметров (в частности, для выявления недопустимых отклонений напряжения в электрических узлах).

В данном (максимально упрощенном) варианте планирования восстановления не предусматривается оптимизация планов, не учитывается наличие системной автоматики. Эти задачи будут решаться при дальнейшем развитии изложенной здесь концепции.

КОММУТАЦИОННЫЙ УРОВЕНЬ

Автоматическая разработка коммутационного плана восстановления рассматривается на примере фрагмента электрической сети Сочинской энергосистемы (рис. 4 на с. 57) при простой аварии (короткое замыкание на линии с отказом линейного выключателя и работой устройства резервирования отказов выключателя УРОВ).

Необходимо разработать план восстановления электрической сети — последовательность коммутационных операций для перевода сети в такое состояние, в котором обеспечивается максимальное энергоснабжение потребителей. Интуитивно понятно, что это финитное восстановленное состояние должно быть по возможности наиболее близким к исходному (доаварийному) состоянию сети [3, 4]. При соблюдении этих условий наилучший план восстановления должен содержать минимальное количество операций. При этом операциями являются не только коммутации, но и инициирование заявок на ремонт элементов оборудования.

Алгоритм восстановления включает:

1. Определение ситуации:
а) повреждение оборудования (КЗ);
б) отказы и затягивания выключателей;
в) погашения на объектах.
2. Определение восстанавливаемых объектов.
3. Определение центров питания сети (ЦП).
4. Эвристическое определение рекомендуемого ЦП для восстановления.
5. Эвристическое определение порядка восстановления (по объектам).
6. Инициирование заявки на ремонт поврежденного оборудования.
7. Инициирование заявки на ремонт отказавшего выключателя.
8. При отказе УРОВ «проверить состояние УРОВ».
9. Восстановление объектов:
а) отключение линейного разъединителя (ЛР) поврежденной линии;
б) включение выключателей, отключенных при аварии от РЗА;
в) нахождение траектории (оборудования) от ЦП к объекту;
г) проверка положения выключателей вдоль траектории;
д) включение отключенных выключателей вдоль траектории (с учетом заявок);
е) для выключателей (пункт 9д), на которые есть заявки, задать «свернуть работы по заявке в срок аварийной готовности (АГ)», определить (если это возможно) «обходные пути» при недопустимо большом времени АГ для заявки на включаемый выключатель.
10. Подсчет коммутаций, заявок, АГ.

===План восстановления отделившейся сети ===
Предполагается КЗ на оборудовании
ВЛ 110 кВ Волконка — Лазаревская
Отказ выключателя
Волконка В-110 ВЛ Лазаревская
Срабатывание УРОВ выключателя
Погашения на объектах:
Головинка
Волконка
Якорная щель
Лазаревская
Магри
Рекомендуемый центр питания для восстановления: Дагомыс
1. Инициировать заявку на вывод в ремонт оборудования
ВЛ 110 кВ Волконка — Лазаревская
2. Попытаться ключом отключить
Волконка В-110 ВЛ Лазаревская
Если он не отключается, отключить его разъединителями с нарушением блокировки
3. Инициировать заявку на вывод в ремонт выключателя
Волконка В-110 ВЛ Лазаревская
4. Восстановление объекта Лазаревская
===План восстановления для подстанции Лазаревская ===
4.1. Отключить Лазаревская ЛР-110 кВ ВЛ Волконка
4.2. Включить выключатель Лазаревская В-110 Т-1
4.3. Включить выключатель Лазаревская СВ-110
=== Восстановление от центра питания ===
Дагомыс
5. Восстановление объекта Волконка
=== План восстановления для подстанции Волконка ===
5.1. Отключить ЛР
ВЛ 110 кВ Волконка — Лазаревская
5.2. Включить выключатель Волконка ШСВ 10 кВ
5.3. Включить выключатель Волконка В-110 ВЛ Якорная щель
5.4. Включить выключатель Волконка ШСВ 110 кВ
5.5. Включить выключатель Волконка В-110 Т-1
=== Восстановление от центра питания Дагомыс ===
[Комментарий: программа определяет траекторию от центра питания до восстанавливаемой подстанции и проверяет положения выключателей вдоль траектории; для отключенных выключателей проверяется наличие ремонтных заявок.]
ВЛ 110 кВ Волконка — Якорная щель
ВЛ 110 кВ Дагомыс — Якорная щель тяговая
ВЛ 110 кВ Дагомыс — Якорная щель тяговая
Дагомыс
Якорная щель
---- должна быть связь с линией
ВЛ 110 кВ Волконка — Якорная щель через подстанцию
Якорная щель
Якорная щель СВ-110
---- выключатель включен
Дагомыс ВЭ ВЛ 110 кВ Якорная щель
---- выключатель включен
Якорная щель РП-110
---- выключатель отключен
ВЛ 110 кВ Волконка — Якорная щель
Волконка
Якорная щель
Волконка В-110 ВЛ Якорная щель
---- выключатель отключен
Якорная щель РП-110
заявки нет
5.6. Включить выключатель Якорная щель РП-110
Волконка В-110 ВЛ Якорная щель
заявки нет

Коммутаций 10
Заявок 1
АГ сум. 0

ВЫВОД

При практическом отсутствии традиционных универсальных программ автоматизацию послеаварийного восстановления в энергосистемах и программ в электрических сетях целесообразно выполнять с помощью интеллектуальных систем. Использование в этих системах методов экспертных систем и программ-рассуждений позволяет создать гибкие алгоритмы восстановления, основанные на эвристических правилах и диспетчерском опыте. Алгоритмы восстановления должны обеспечивать возможность развертывания планов восстановления на двух иерархических уровнях: системном (действия с оборудованием типа линий электропередачи) и коммутационном (действия с выключателями).

ЛИТЕРАТУРА

1. Буй Динь Тхань, Воропай Н.И. Восстановление системы электроснабжения с распределенной генерацией после крупной аварии // Промышленная энергетика. 2011. № 8. С. 12–18.
2. Успенский М.И., Кызродев И.В. Методы восстановления электроснабжения в распределительных сетях. Сыктывкар, Коми научный центр УрО РАН, 2010.
3. CIGRE SC 8 WG 38.08 TF04: The Use of Expert System for Power System Restoration (Final Report (Draft) Feb 1994.
4. Knowledge-Based Behavior Interface: Its Application to Power Network Restoration Support System // IEEE Transactions on Power Systems. Vol. 11. No. 1. February 1996. Pp. 383–389.
5. Каковский С.К., Любарский Ю.Я. Программная система-советчик для управления электрическими сетями // Электрические станции. 2016. № 2.
6. Рабинович М.А. Отображение оперативной информации. Комплекс КАСКАД-НТ.2.0. М.: ЭНАС, 2004.
7. Любарский Ю.Я. Интеллектуальные информационные системы. М.: Наука, 1990.

АВТОМАТИЧЕСКАЯ РАЗРАБОТКА КОММУТАЦИОННОГО ПЛАНА ВОССТАНОВЛЕНИЯ РАССМАТРИВАЕТСЯ НА ПРИМЕРЕ ФРАГМЕНТА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ СОЧИНСКОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ (ЗАДАН РЕМОНТ ВЛ 110 КВ ВОЛКОНКА — МАГРИ, ЗАТЕМ КЗ НА ВЛ 110 КВ ВОЛКОНКА — ЛАЗАРЕВСКАЯ С ОТКАЗОМ ЛИНЕЙНОГО ВЫКЛЮЧАТЕЛЯ НА ВОЛКОНКЕ)

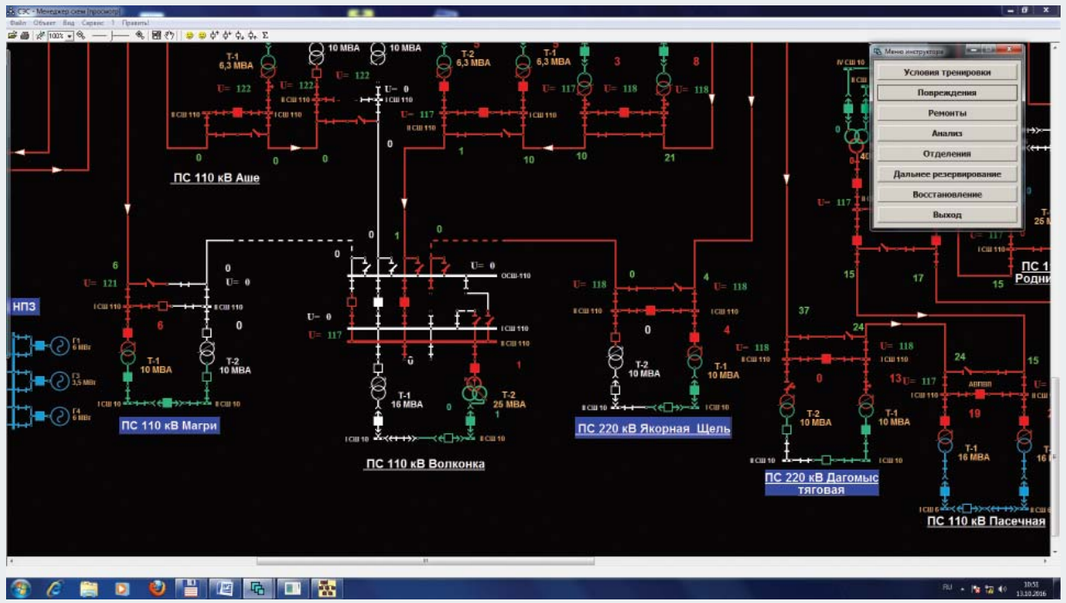

Рис. 4