

Варганова А.В., Ирихов А.С.

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ СЕТЕЙ 6-10 кВ С ИСТОЧНИКАМИ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ГЕНЕРАЦИИ

Стратегия развития электроэнергетики в Российской Федерации до 2030 г. создает условия для введения в эксплуатацию большого числа источников малой генерации, включая возобновляемые. Такая тенденция обеспечит потребителей сравнительно недорогой и чистой энергией. Однако в РФ внедрение источников малой генерации и ВИЭ только набирает темпы. Увеличение числа и мощности таких источников приведет к их объединению в локальные системы. Таким образом, чтобы повысить надежность и экономичность систем электроснабжения с источниками распределенной генерации целесообразно на этапе проектирования решить несколько задач, таких как определение оптимальной точки подключения к внешней системе и определение наилучшей конфигурации сети. При разработке алгоритма определения экономически целесообразного подключения к внешней сети обязательно необходимо учитывать ограничения по пропускной способности элементов и балансовые ограничения. Кроме того, выбор оптимальной точки подключения должен обеспечивать надежное и экономичное электроснабжение. В данной работе предлагается подход, позволяющий оценивать надежность распределительных устройств главных понижающих подстанций, которые для систем электроснабжения 6-10 кВ являются точками подключения к внешней системе. Основной задачей разработанного алгоритма является определение экономического ущерба от перерыва электроснабжения. При расчете величины ущерба учитываются не только вероятные характеристики, основанные на расчете показателей надежности схемы распределительного устройства (время восстановления и параметр потока отказов), но и разница в тарифах на электроэнергию при переключении потребителей на резервный внешний источник, а также изменение величины потерь в системе электроснабжения. В статье на примере схемы с двумя рабочими системами шин приводится пример расчета показателей надежности для типового оборудования распределительных устройств 110 и 220 кВ.

Ключевые слова: распределенная генерация, оптимальный режим, модель, распределительное устройство, ущерб от перерыва электроснабжения, система электроснабжения, источники малой генерации.

ВВЕДЕНИЕ

Увеличение энергопотребления в Российской Федерации привело к увеличению объемов распределенной генерации. Данные тенденции отмечаются также и в стратегии развития электроэнергетики до 2030 г. Актуальность развития малой энергетики обусловлена рядом достоинств по сравнению с традиционным электроснабжением: небольшой срок окупаемости, низкие тарифы на электроэнергию и тепло, высокие значения КПД при использовании когенерационных установок.

Рост числа источников малой генерации приведет к созданию систем электроснабжения с активными потребителями и появлению рынка малой генерации. Уже сейчас ведутся исследования по созданию модели рынка микрогенерации – разработка А-Платформы – Российская программная платформа управления распределенной энергетикой [1]. Для того чтобы данные системы надежно и экономично функционировали, необходимо уже на этапе проектирования определять их оптимальную конфигурацию и необходимость подключения к внешней сети.

Одной из задач в области оптимизации режимов распределительных сетей является сокращение потерь мощности, в том числе за счет реконфигурации схемы. В работе [2] проведен анализ замкнутой электрической сети и рассмотрено влияние потери мощности на расположение точки потока раздела. Предложено учитывать потери мощности и электроэнергии при расчете замкнутых сетей.

Петровой Д.Г. в статье [3] предложена методика определения точки экономического разрыва в сложном замкнутом сетях напряжением 10 кВ. Приведены примеры

расчетов мощностей участков сети с учетом и без учета активных и реактивных сопротивлений участков сети.

Авторами в [4] предлагается методика определения точки размыкания в сложно замкнутых воздушных сетях 110 кВ, обеспечивающая минимальные потери активной мощности и напряжения. Справедливость предлагаемой методики проверена на примере нескольких типичных сетей 110 кВ. Предлагаемая методика обеспечивает минимальные потери активной мощности и напряжения и может использоваться в реальных сетях.

В [5] показано, что неучет потерь активной мощности в линии и реальных значений напряжения в ее узлах, может привести к неверному определению точки размыкания. Предложена методика определения точки размыкания, учитывающая потери мощности в линии и реальных значений напряжения. В данной работе приведены примеры расчета сетей 35 кВ.

Разработка методики определения оптимальной точки размыкания сложном замкнутых сетей 10 кВ ведется в статьях [6]. Данная методика обеспечивает минимальные потери активной мощности и может использоваться в реальных сетях.

В распределительных сетях наибольшее распространение получила петлевая схема сети, на практике точка размыкания берется произвольно, что ведет к значительным потерям активной мощности. Авторами работы [7] разработана методика определения точки разрыва для сложном замкнутых воздушных сетей 10 кВ, которая учитывает потери мощности в линии и реальные значения напряжения.

Точка размыкания должна выбираться по критерию минимизации потерь активной мощности, электроэнергии и обеспечивать надежность электроснабжения.

В работе [8] предложен системный подход, позволяющий ускорить и автоматизировать процесс принятия решений о технической возможности технологических присоединений энергоприемников потребителей к распределительным электрическим сетям.

В статье [9] усовершенствована одна из основных задач, решаемых для всех электрических сетей с разомкнутой топологией, в том числе для городских электрических сетей, а именно задача выбора оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях Smart Grid.

Программный продукт [10] предназначен для определения оптимальной точки размыкания сети с напряжением 6-10 кВ.

Вопросы определения оптимальных точек размыкания в сложноразомкнутых электрических сетях являются сложной дискретной задачей, которые решаются с помощью генетического алгоритма, рассмотренного в статье [11]. Данный алгоритм позволит снизить потери активной мощности.

Тарнавский Я.В. в статье [12] приводит усовершенствование выбора оптимальных точек размыкания электрических сетей 6-10 кВ. Разработанный алгоритм апробирован на примере оптимизации точек размыкания городских распределительных сетей.

Для обеспечения снижения потерь электроэнергии в работе [13] предлагается методика определения оптимальных точек размыкания электрической сети. Апробация разработанной методики произведена на примере электрической сети 110 кВ Приморской энергосистемы.

В статье [14] проводится оценка возможности применения метода размыкания сетей с двусторонним питанием для оптимизации режима работы системы электроснабжения.

Авторами в работе [15] проведен анализ и оценка эффективности различных методов снижения потерь мощности и напряжения в распределительных сетях. Разработан и применен алгоритм расчета измененной распределительной схемы. Результаты работы показали, что изменение топологии сети обладает высокой эффективностью и позволяет снизить потери электроэнергии.

Уточненная модель и алгоритм оптимизации точек разрезов в распределительной электрической сети разработаны в работе [16]. Для определения величины потерь в питающей сети получена специальная математическая модель замкнутой сети, позволяющая осуществлять данную операцию с минимальными вычислительными затратами. Данный алгоритм позволяет снизить ущерб от недоотпуска электроэнергии.

Алгоритм, позволяющий автоматически управлять конфигурацией сети и определять место размыкания в электрических сетях, приведен в [17]. Данный алгоритм производит расчет всех возможных конфигураций сети и на основании критериев минимума потерь в линиях, остаточного напряжения выбирает оптимальный вариант.

Возможность уменьшения потерь активной мощности за счет определения оптимальных мест размыкания городской распределительной электрической сети для нормальной схемы работы, так и при проведении плановых и аварийных переключений рассматривается в статье [18]. Приводится алгоритм поиска

оптимальных мест размыкания с учетом технических и технологических ограничений.

Результаты уменьшения потерь электроэнергии за счет оптимизации топологии схем электроснабжения через определение мест размыкания распределительных сетей 6 кВ представлены в работе [19].

В статье [20] приводятся различные мероприятия по оптимизации режимов работы электрических сетей, снижению потерь электроэнергии в электрических сетях. Особое внимание уделено определению мест размыкания сетей 110 кВ и выше, а также сетей 6-35 кВ с двусторонним питанием.

Методика определения точек потока раздела в электрических сетях 35 кВ, которая позволяет снизить потери активной мощности и улучшить качество электроэнергии, приводится в статье [21].

Новый подход к оптимизации работы энергосистемы на уровне интервальной неопределенности предложен в работе [22]. Задача оптимизации состоит в минимизации риска, вызванного неопределенностью информации.

В статье [23] предлагается новая модель для реконфигурации системы распределения, интегрированная с оптимальным потоком мощности и оптимальным переключением конденсатора на основе гибридного подхода. Цель состоит в том, чтобы минимизировать стоимость генерирования всей системы распределения, и подвержена ограничениям, таким как ограничение мощности ветвей, минимальные и максимальные пределы мощности подстанций или распределенные генераторы, пределы напряжений шины и радиальная оптимальная работа сетей.

В работе [24] с использованием метода динамического программирования авторами разработан подход поиска наилучшего места расположения источников малой генерации в условиях промышленных и городских систем электроснабжения.

Исследование [25] направлено на оценку новых достижений в оптимизации работы и планировании энергосистемы. В данной работе представлен метод, обеспечивающий оптимальную конфигурацию сети для достижения минимальных потерь мощности в сети.

Данная работа посвящена поиску наилучшего варианта подключения к внешнему источнику системы электроснабжения 6-10 кВ с источниками малой генерации, учитывая при этом надежность и экономичность электроснабжения.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ТОЧКИ ПОДКЛЮЧЕНИЯ К ВНЕШНЕМУ ИСТОЧНИКУ

Одним из критериев выбора оптимальной точки подключения к внешней сети является минимум ущерба от перерыва электроснабжения. Как уже отмечалось выше, точками подключения для распределительных сетей 6-10 кВ являются главные понизительные подстанции.

Таким образом, необходимо осуществить оценку экономического ущерба от перерыва электроснабжения схем распределительных устройств главных понизительных подстанций. Кроме того, при расчетах необходимо учитывать наличие резервного источника.

Таким образом, ущерб будет определяться для одного из следующих нижеперечисленных случаев.

Если в системе электроснабжения отсутствует резервный источник – возникает ущерб Y_1 , величина которого будет определяться ущербом от недоотпуска электроэнергии поставщиком электроэнергии и ущербом, возникающим у потребителей, при наличии предприятий в системе электроснабжения:

$$Y_1 = \beta_1 P_{\text{потр}} T_v + y_0 P_{\text{потр}} T_v, \quad (1)$$

где β_1 – тариф на электроэнергию основного источника, руб./кВт·ч; $P_{\text{потр}}$ – мощность потребителей, кВт; T_v – годовая продолжительность аварийных отключений, ч; y_0 – удельный ущерб потребителей, руб./кВт·ч.

Если в системе электроснабжения имеются резервные источники, полностью покрывающие нагрузку потребителей, то ущерб Y_2 определяется дополнительными затратами, возникающими по причине изменения тарифа и потерь электроэнергии в распределительных сетях при подключении к резервному внешнему источнику:

$$Y_2 = (\beta_2 - \beta_1) P_{\text{потр}} T_v + (\beta_2 \Delta W_{\text{ИП(рез)}} - \beta_1 \Delta W_1), \quad (2)$$

где β_2 – тариф на электроэнергию резервного источников, руб./кВт·ч; $\Delta W_{\text{ИП(рез)}}$ – потери электроэнергии в линиях электропередачи при передаче мощности от резервного источника за время T_v , МВт·ч; ΔW_1 – потери электроэнергии в линиях электропередачи при передаче мощности от рассматриваемого источника за время T_v , кВт·ч.

Если в системе имеется резервный источник, покрывающий частично нагрузку потребителей на время восстановления основного источника – Y_3 , то в данном случае ущерб будет оцениваться ущербом потребителей величиной уменьшения мощности, учитывая при этом изменение затрат на приобретение мощности от резервного источника и потерь электроэнергии.

В общем виде величина экономического ущерба рассчитывается по выражению

$$Y_3 = y_0 (P_{\text{потр}} - P_{\text{ИП(рез)}}) T_v + (\beta_2 - \beta_1) P_{\text{ИП(рез)}} T_v + (\beta_2 \Delta W_{\text{ИП(рез)}} - \beta_1 \Delta W_1), \quad (3)$$

где $P_{\text{ИП(рез)}}$ – мощность, потребляемая от резервного источника на время перерыва электроснабжения, кВт.

Блок-схема алгоритма оценки ущерба от перерыва электроснабжения приведена на **рис. 1**. Алгоритм реализован в оригинальном программном продукте, используя при этом базу данных, основные принципы построения которой приведены в работе [26].

Основными исходными данными для расчета (блок 1 на **рис. 1**) являются схема электроснабжения с параметрами силовых трансформаторов и линий электропередачи, возможные источники питания: схемы распределительных устройств, типы установленного оборудования, величина мощности, принимаемая от внешнего источника, тарифы на электроэнергию, а также показатели надежности элементов. Кроме того, необходимо знать величину удельного ущерба – либо фактическое значение, либо справочное.

Важным этапом расчетов является оценка показателей надежности схемы распределительного устройства внешнего источника электроснабжения (блок 2 на **рис. 1**).

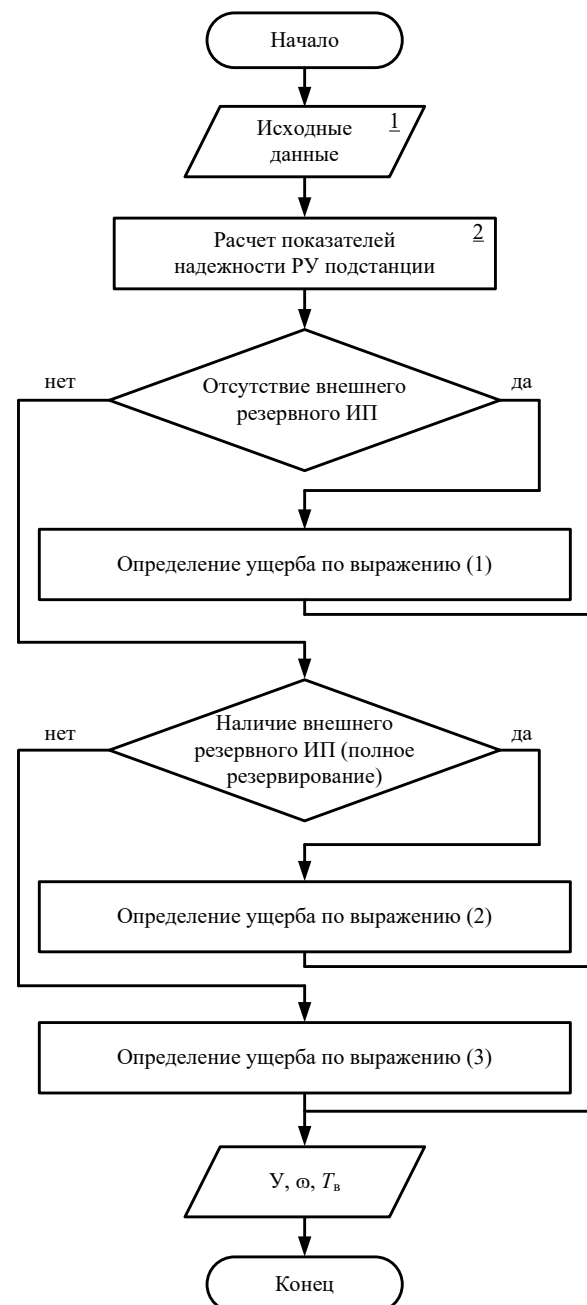


Рис. 1. Блок-схема алгоритма оценки экономического ущерба от перерыва электроснабжения внешнего источника

Структурные схемы надежности распределительных устройств строятся на основании логики работы и резервирования отдельных присоединений. Для расчета показателей надежности схем распределительных устройств были разработаны алгоритмы, отображающие различные варианты соединения элементов:

- «—» – последовательное соединение элементов;
- «||» – параллельное соединение элементов;
- «⊥» – поперечная связь элементов.

В качестве примера приведена структурная схема «Две рабочие системы шин» представлена на **рис. 2**.

Для элементов схем распределительных устройств введены условные обозначения элементов: W – воздушная линия электропередачи, QS – разъединитель, TA – трансформатор тока, TV – трансформатор напряжения, Q – выключатель, RU – ограничитель перенапряжения, T – силовой трансформатор.

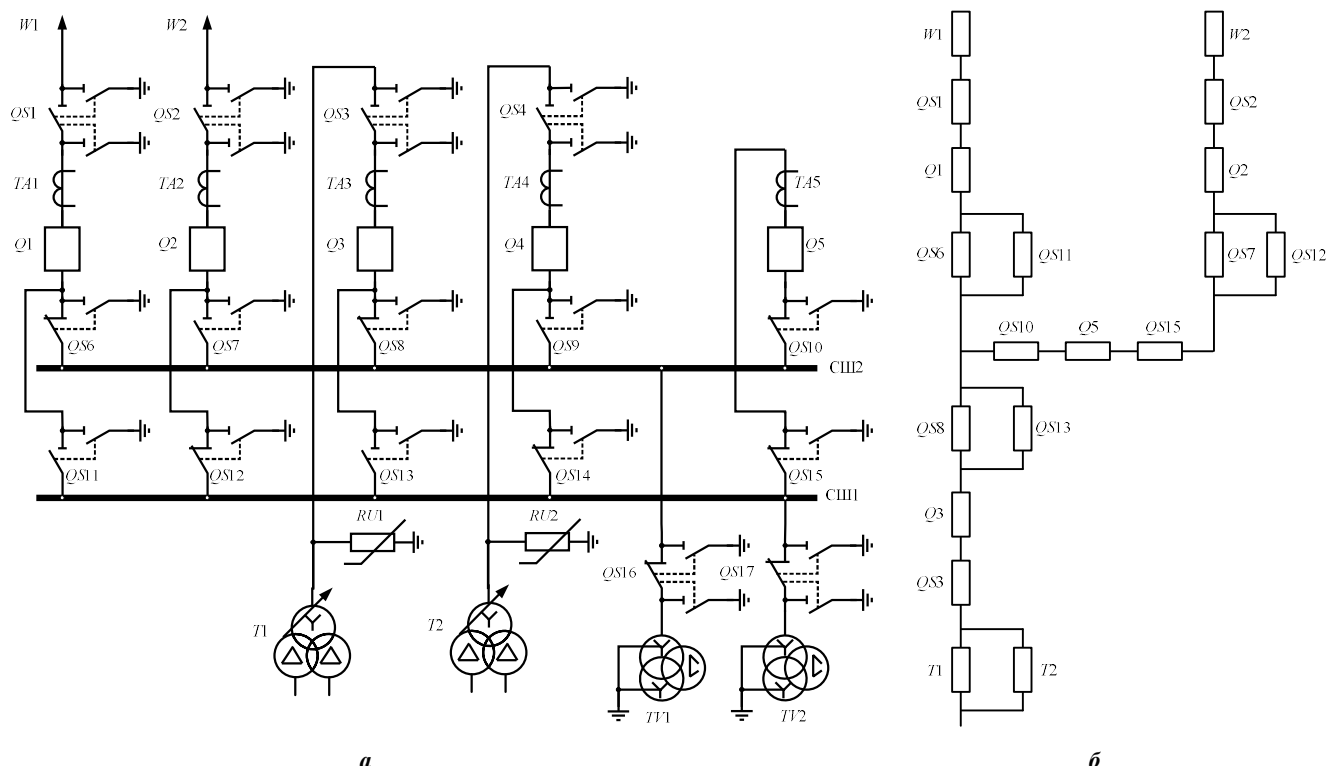


Рис. 2. Две рабочие системы шин, схема 13: а – однолинейная схема; б – структурная схема надежности

При составлении схемы было учтено, что необходима установка на каждом присоединении второго шинного разъединителя, что позволяет повысить надежность всех присоединений. Резервирование питающих линий осуществляется за счет учета надежности других линий и элементов шиносоединительного выключателя. Также учтено резервирование трансформаторов.

Логическое соединение элементов структурной схемы надежности для схемы РУ «Две рабочие системы шин» имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} & (C) - (QS \parallel QS) - Q - QS - (T1 \parallel T2); \\ & C = (W1 - QS - Q - (QS \parallel QS)) \parallel \\ & \parallel (W2 - QS - Q - (QS \parallel QS) - QS - Q - QS). \end{aligned} \quad (4)$$

В целом алгоритм оценки структурной надежности внешней точки подключения имеет вид, приведенный на рис. 2.

После определения эквивалентных показателей надежности схемы распределительного устройства главной понизительной подстанции параметра потока отказов ω и времени восстановления T_v определяется ущерб от перерыва электроснабжения U в зависимости от наличия резервного внешнего источника и величины ограничения мощности на время восстановительных работ (см. рис. 1). В результате работы алгоритма получаем величины эквивалентных показателей надежности схем распределительных устройств и величину ущерба от перерыва электроснабжения.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОГО УСТРОЙСТВА ТОЧКИ ПРИМЫКАНИЯ К ВНЕШНЕЙ СЕТИ

На основании разработанного программного обеспечения и алгоритма оценки надежности на примере

схемы с двумя рабочими системами шин и схемы с двумя рабочими и обходной системами шин осуществлен расчет основных показателей надежности при условии установки трансформаторов различных мощностей. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 1
Исходные данные для расчета показателей надежности

Оборудование	Параметры надежности	$U_{ном}, \text{кВ}$	
		110	220
Одноцепная воздушная линия на стальных опорах длиной 1 км	ω , отказ/год	0,013	0,005
	T_v , ч	9	11
	K_v	0,117	0,055
Разъединитель	ω , отказ/год	0,01	0,01
	T_v , ч	11	7
	K_v	0,11	0,07
Высоковольтный выключатель	ω , отказ/год	0,03	0,03
	T_v , ч	26,28	43,8
	K_v	0,7884	1,314

Таблица 2
Типовые значения показателей надежности для схем 13-110/220 и 13Н-110/220

Номер схемы	Параметры надежности	Мощность трансформатора, МВА		
		2,5–7,5	10–80	Более 80
13-110	$\omega_{(э\text{кв})}$, 1/г	0,2885	0,2901	1,3314
	$K_{в(э\text{кв})}$	3,5207	3,9627	53,768
	$T_{в(э\text{кв})}$, ч	12,1997	13,6593	40,3838
13Н-110	$\omega_{(э\text{кв})}$, 1/г	0,561	0,5625	1,6038
	$K_{в(э\text{кв})}$	3,9704	4,4124	54,2176
	$T_{в(э\text{кв})}$, ч	7,0771	7,8436	33,8045
13-220	$\omega_{(э\text{кв})}$, 1/г	-	0,462	0,39
	$K_{в(э\text{кв})}$	-	9,9831	7,8231
	$T_{в(э\text{кв})}$, ч	-	21,606	20,0566
13Н-220	$\omega_{(э\text{кв})}$, 1/г	-	1,2798	1,2078
	$K_{в(э\text{кв})}$	-	14,4005	12,2405
	$T_{в(э\text{кв})}$, ч	-	11,2513	10,1337

Полученные значения могут быть использованы при оценке надежности схемы распределительных сетей, учитывая при этом надежность схемы распределительного устройства. Кроме того, на основании данных значений можно определить величины экономического ущерба для заданной системы электроснабжения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предлагается подход по оценке ущерба от перерыва электроснабжения внешнего источника распределительных сетей 6-10 кВ.

Разработанный алгоритм позволяет определять ущерб от перерыва электроснабжения для возможных вариантов конфигурации сети: без дополнительного резервирования системы электроснабжения; с полным или частичным резервированием мощности от внешнего источника.

С целью поиска длительности восстановления созданы алгоритмы оценки структурной надежности возможных схем распределительных устройств главных понизительных подстанций, учитывающих надежность распределительных устройств высокого и низкого напряжения, а также основных элементов подстанции: питающих линий ВН и НН, разъединителей, выключателей и силовых трансформаторов.

Данное исследование позволит осуществить разработку алгоритма поиска оптимальной точки подключения к внешней сети с учетом фактора надежности, а также определить необходимость внешнего электроснабжения в условиях рассматриваемой системы электроснабжения с источниками малой генерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Официальный сайт «А-Платформа – Российская программная платформа управления распределённой энергетикой». URL: <https://a-platform.ru/> (дата обращения 28.06.2021)
- Кулаков А.А., Чертова Т.В., Медведев А.В. К методике определения точки потока раздела в замкнутой электрической сети // Идеи молодых ученых – агропромышленному комплексу: агроинженерные и сельскохозяйственные науки: материалы студенческой научной конференции Института агроинженерии, Института агроэкологии. Челябинск: ЮУрГАУ, 2020. С. 226–235.
- Петрова Д.Г. Методика определения точки экономического разрыва в сложном замкнутом сетях 10 кВ // Интеллектуальная собственность и современные техника и технологии для развития экономики: материалы VI Республиканской молодежной научно-практической конференции в рамках Всероссийского студенческого форума «Инженерные кадры – будущее инновационной экономики России». Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. С. 80–83.
- Сидорова В.Т., Карчин В.В. Усовершенствование методики определения точки размыкания в сложном замкнутом воздушных сетях 110 кВ // Электроэнергетика глазами молодежи: материалы VIII Международной научно-технической конференции. Самара: СамГТУ, 2017. С. 104–107.
- Сидорова В.Т., Карчин В.В. Методика определения точки размыкания в сложном замкнутом воздушных сетях напряжением 35 кВ // Пром-Инжиниринг: труды III Международной научно-технической конференции. Челябинск: ЮУрГАУ, 2017. С. 255–258.
- Толстогузов А.А., Полянин С.В. Методика определения точек размыкания для сети 10 кВ // Молодой исследователь: от идеи к проекту: материалы I студенческой научно-практической конференции. Йошкар-Ола: МарГУ, 2017. С. 80–83.
- Сидорова В.Т., Карчин В.В. Перераспределение потоков мощностей в сложном замкнутом воздушных сетях 10 кВ для уменьшения потерь и улучшения качества электроэнергии // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 11-12. С. 51–55.
- Гребенюк Г.Г., Крыгин А.А., Никишов С.М. Подход к алгоритмизации выбора точки технологического присоединения к электрическим сетям // Проблемы управления. 2013. № 3. С. 60–70.
- Фурсанов М.И., Золотой А.А. О выборе оптимальных точек размыкания в городских электрических сетях в условиях SMART GRID // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2018. Т. 61. № 3. С. 207–219. doi: 10.21122/1029-7448-2018-61-3-207-219
- Свидетельство о гос. регистрации прогн. для ЭВМ № 2015616877. Определение оптимальной точки размыкания сети / Мусаев Т.А.; заявитель Мусаев Т.А.; заявл. 27.04.2015, опубл. 25.06.2015.
- Кокин С.Е. Определение оптимальных точек размыкания в сложном замкнутом электрических сетях с помощью генетического алгоритма // Промышленная энергетика. 2012. № 2. С. 28–31.
- Тарнавский Я.В. Основные принципы определения оптимальных мест размыкания распределительных электрических сетей // Li international correspondence scientific and practical conference "International scientific review of the problems and prospects of modern science and education". Boston: Problems of Science, 2018. С. 43–44.
- Савина Н.В., Сцепуро К.И. Реконфигурация схемы электрических сетей как средство снижения потерь электроэнергии // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. № 2(42). С. 91–102.
- Валеев И.М., Камалиев Р.Н., Мусаев Т.А. Оценка возможности применения метода размыкания сетей с двусторонним питанием в условиях действующей системы электроснабжения городского района напряжением 6(10) кВ // Диспетчеризация и управление в электроэнергетике: материалы докладов XII Всероссийской открытой молодежной научно-практической конференции. Казань: КГЭУ, 2017. С. 44–49.
- Валеев И.М., Нгуен Х.Д. Разработка методики расчета потерь мощности и уровня напряжения в сложных распределительных сетях // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2017. Т. 19. № 1-2. С. 75–85.
- Методические принципы определения оптимальных мест размыкания распределительных электрических сетей с учетом питающей сети 110 кВ и выше / М.И. Фурсанов, А.А. Золотой, В.В. Макаревич, А.Н. Муха // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2008. № 6. С. 23–32.
- Определение мест размыкания распределительных электрических сетей в задаче повышения надежности электроснабжения потребителей / В.Ю. Вуколов, Д.В. Зырин, И.А. Трапезников, А.А. Лоскутов // Пром-Инжиниринг: труды II Международной научно-технической конференции. Челябинск: ЮУрГАУ, 2016. С. 316–321.
- Щекохихин А.В. Минимизация потерь активной мощности в городских распределительных электрических сетях за счет выбора оптимальной конфигурации // Омский научный вестник. 1998. № 5. С. 87–91.
- Уменьшение технологических потерь электроэнергии в городских распределительных сетях напряжением 10 (6) кВ путем оптимизации мест размыкания контуров / А.Н. Бесараб, В.Н. Невольниченко, М.Ю. Шабовта, Я.А. Соколов, И.И. Тищенко // Электротехнические и компьютерные системы. 2016. № 21(97). С. 70–75.
- Способы оптимизации режимов работы электрических сетей по потерям мощности / В.Н. Алябьев, А.С. Чернышев, И.В. Ворначева, М.С. Кимлик // Молодежь и XXI

- век – 2020: материалы X Международной молодежной научной конференции. Курск: ЮЗГУ, 2020. С. 268–271.
21. Sidorova V.T., Karchin V.V. Method for identification of break points in 35 kV complex overhead distribution networks // International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. IEEE, 2017. Pp. 1–4. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076261
 22. Method for minimax optimization of power system operation / M. Valdm, M. Keel, O. Liik, H. Tammoja // IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. 2003. Vol. 2. Pp. 1–6. doi: 10.1109/PTC.2003.1304670
 23. Shu J., Quan S. S., Zhang L. Z. Optimal operation of distribution power system including distributed generator // International Conference on Power System Technology. Zhejiang: IEEE, 2010. Pp. 1–6. doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666432
 24. Техничко-экономическое обоснование места установки источников распределенной генерации / Варганова А.В., Байрамгулова Ю.М., Гончарова И.Н., Кроткова О.А. // Электротехнические системы и комплексы. 2019. № 3(44). С. 68–72. doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72
 25. Momoh J. A. Optimal Methods for Power System Operation and Management // PES Power Systems Conference and Exposition. Atlanta: IEEE, 2006. Pp. 179–187. doi: 10.1109/PSCE.2006.296294
 26. Разработка базы данных электрооборудования 35-220 кВ для САПР «ОРУ CAD» / А.В. Варганова, Е.А. Панова, Т.В. Хатюшина, В.С. Кононенко, Х.М. Багаева // Электротехнические системы и комплексы. 2018. №2(39). С. 28–33. doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-28-33

Поступила в редакцию 17 июня 2021 г.

INFORMATION IN ENGLISH

EVALUATION OF EXTERNAL POWER SUPPLY RELIABILITY IN 6-10 kV NETWORKS WITH DISTRIBUTED GENERATION

Aleksandra V. Varganova

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: aleksandra-khlamova@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4675-7511>

Aleksandr S. Irikhov

Postgraduate student, Industrial Electric Power Supply Department, Power Engineering and Automated Systems Institute, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: irihovalexandr@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2310-076>

The strategy for the development of the electric power industry in the Russian Federation until 2030 creates conditions for the commissioning of a large number of sources with small generation, including renewable ones. Such a tendency will provide consumers with relatively inexpensive and pure energy. However, in the Russian Federation, the introduction of sources with small generation and renewable ones is only gaining pace. An increase in the number and power from such sources will result in unification to local systems. Thus, in order to increase the reliability and efficiency of power supply systems with distributed generation sources, it is advisable at the pre-exit stage to solve several tasks, such as the determination of the optimal connection point to the external system and the best network configuration definition. When developing an algorithm, it is necessary to take into account the limitations on the bandwidth of the elements and balance limitations. In addition, the choice of the optimal connection point to the external network should provide reliable and economical power supply. This paper proposes an approach that allows you to evaluate the distribution device reliability at the main pioneering substations, which for 6-10 kV power supply systems are the points of connection to the external network. The main task of the developed algorithm is to define the economics damage from the power break. When calculating the amount of damage, the research group took into account both the probable characteristics, based on the calculation of the reliability indicators of the distribution device (restoration time and failure parameter), and the difference in electricity tariffs when switching consumers to a backup external source, as well as a change in loss in Power supply system. In the article, using the scheme with two working bus systems, an example of calculating the reliability indicators for typical equipment of 110 and 220 kV distribution devices is given.

Keywords: distributed generation, optimal condition, model, switchgear, damage from power break, power supply system, low generation sources.

REFERENCES

1. *A-Platforma – Rossijskaya programmnaya platforma upravleniya raspredel'noy energetikoj* (A-Platform – Russian software platform of distributed energy management). Available at: <https://a-platform.ru/> (accessed 27 June 2021). (In Russian)
2. Kulakov A.A., Chertova T.V., Medvedev A.V. The method of determining the flow point of the section in a closed electrical network. *Idey molodykh uchennykh – agropromyshlennomu kompleksu: agroinzhenernye i selskhozajstvnyye nauki: Materialy studencheskoj nauchnoj konferencii Instituta agroinzhenerii, Instituta agroekologii* [The ideas of young scientists - the agro-industrial complex: agricultural engineering and agricultural sciences: materials of the student scientific conference of the Institute of Agricultural engineering, Institute of Agro-ecology]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2020, pp. 226-235. (In Russian)
3. Petrova D.G. Methods of determining the point of economic rupture in the complex 10 kV networks. *Intellektualnaya sobstvennost i sovremennyye tekhnika i tekhnologii dlya razvitiya ekonomiki : Materialy VI respublikanskoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii v ramkah Vse-rossijskogo studencheskogo foruma «Inzhenernye kadry – budushchee innovacionnoj ekonomiki Rossii»* [Intellectual property and modern techniques and technologies for the development of the economy: Materials of the VI of the Republican youth scientific and practical conference in the framework of the All-Russian Student Forum "Engineering Persons - the future of the innovation economy of Russia"]. Joshkar-Ola, PGU Publ., 2018, pp. 80-83. (In Russian)
4. Sidorova V.T., Karchin V.V. Improving the method of determining the point of opening in complex closed air 110 kV networks. *Elektroenergetika glazami molodezhi - 2017: Materialy VIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Electric power in the eyes of youth - 2017: Materials of the VIII International Scientific and Technical Conference]. Samara, SamGTU Publ., 2017, pp. 104-107. (In Russian)

5. Sidorova V.T., Karchin V.V. Methods of determining the point of opening in the complex air distribution networks with a voltage of 35 kV. *Prom-Inzhiniring: Trudy III mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Prom-Engineering: Proceedings of the III International Scientific and Technical Conference.]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2017, pp. 255-258. (In Russian)
6. Tolstoguzov A.A., Polyaniin S.V. Methods for determining the opening points for a 10 kV network. *Molodoj issledovatel': ot idei k projektu: materialy I studencheskoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Young researcher: from the idea of the project: materials I student scientific and practical conference.]. Joshkar-Ola, Mari State University Publ., 2017, pp. 80-83. (In Russian)
7. Sidorova V.T., Karchin V.V. Redistribution of power flows in the complex 10 kV air networks to reduce losses and improve the quality of electricity. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2016, no. 11-12, pp. 51-55. (In Russian)
8. Grebenyuk G.G., Krygin A.A., Nikishov S.M. Approach to the algorithm for choosing a process of technological connection to electrical networks. *Problemy upravleniya* [Control Sciences], 2013, no. 3, pp. 60-70. (In Russian)
9. Fursanov M.I., Zolotoj A.A. On the selection of optimal opening points in urban electrical networks in SMART Grid. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh obedinenij SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2018, vol. 61, no. 3, pp. 207-219. (In Russian) doi 10.21122/1029-7448-2018-61-3-207-219
10. Musaev T.A. *Opreделение optimalnoj tochki razmykaniya seti* [Definition of the optimal network opening point]. Computer program RF, no. 2015616877, 2015.
11. Kokin S.E. Determination of optimal opening points in complex electrical networks using a genetic algorithm. *Promyshlennaya energetika* [Industrial power engineering], 2012, no. 2, pp. 28-31. (In Russian)
12. Tarnavskij YA.V. Basic principles for determining optimal places for opening distribution electrical networks. Li international correspondence scientific and practical conference "international scientific review of the problems and prospects of modern science and education". Boston, PROBLEMS OF SCIENCE Publ., 2018, pp. 43-44. (In Russian)
13. Savina N.V., Scepuo K.I. Reconfiguration of the circuit of electrical networks as a means of reduced electricity loss. *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta* [Bulletin of the Kazan State Energy University], 2019, vol. 11, no. 2(42), pp. 91-102. (In Russian)
14. Valeev I.M., Kamaliev R.N., Musaev T.A. Evaluation of the possibility of applying the method of opening double-sided networks in the conditions of the current power supply system of the urban area of 6 (10) kV. *Dispetcherizaciya i upravlenie v elektroenergetike: Materialy докладов XII Vserossijskoj otkrytoj molodezhnoj nauchno-prakticheskoy konferencii* [Dispatch and management in the electric power industry: materials of reports of the XII All-Russian open youth scientific and practical conference.]. Kazan, KSEU Publ., 2017, pp. 44-49. (In Russian)
15. Valeev I.M., Nguen H.D. Development of the method of calculating power loss and voltage level in complex distribution networks. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Problemy energetiki* [Power engineering: research, equipment, technology], 2017, vol. 19, no. 1-2, pp. 75-85. (In Russian)
16. Fursanov M.I., Zolotoj A.A., Makarevich V.V., Muha A.N. Methodical principles for determining the optimal places for opening distribution electrical networks taking into account 110 kV supply network. *Energetika. Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij i energeticheskikh obedinenij SNG* [Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations], 2008, no. 6, pp. 23-32. (In Russian)
17. Vukolov V.YU., Zyryn D.V., Trapeznikov I.A., Loskutov A.A. Determination of places of opening distribution electrical networks in the task of improving the electrical supply reliability. *Prom-Inzhiniring: trudy II mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii* [Prom-Engineering: Proceedings of the II International Scientific and Technical Conference.]. Chelyabinsk, SUSU Publ., 2016, pp. 316-321. (In Russian)
18. Shchekochihin A.V. Minimizing the loss of active power in urban distribution electrical networks by selecting the optimal configuration. *Omskij nauchnyj vestnik* [Omsk Scientific Bulletin], 1998, no. 5, pp. 87-91. (In Russian)
19. Besarab A.N., Nevolnichenko V.N., Shabovta M.YU., Sokolov YA.A., Tishchenko I.I. Reducing the technological loss of electricity in urban distribution networks with a voltage of 10(6) kV by optimizing the location of contours. *Elektrotekhnicheskie i kompyuternye sistemy* [Electrotechnic and Computer Systems], 2016, no. 21(97), pp. 70-75. (In Russian)
20. Alyabyev V.N., Chernyshev A.S., Vornacheva I.V., Kimlik M.S. Ways to optimize the modes of electrical networks by power loss. *Molodezh i XXI vek - 2020: materialy X Mezhdunarodnoj molodezhnoj nauchnoj konferencii* [Youth and XXI century – 2020: Materials X International Youth Scientific Conference.]. Kursk, SWSU Publ., 2020, pp. 268-271. (In Russian)
21. Sidorova V.T., Karchin V. V. Method for identification of break points in 35 kV complex overhead distribution networks. International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing. St. Petersburg, IEEE Publ., 2017, pp. 1-4. doi: 10.1109/ICIEAM.2017.8076261
22. Valdm M., Keel M., Liik O., Tammoja H. Method for minimax optimization of power system operation. IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, 2003, vol. 2, pp. 1-6 doi: 10.1109/PTC.2003.1304670
23. Shu J., Quan S. S., Zhang L. Z. Optimal operation of distribution power system including distributed generator. International Conference on Power System Technology. IEEE, 2010, Pp. 1-6. doi: 10.1109/POWERCON.2010.5666432
24. Varganova A.V., Bayramgulova Yu.M., Goncharova I.N., Krotkova O.A. Technical and economic substantiation of the place of installation of sources of distributed generation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2019, no. 3 (44), pp. 68-72. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2019-3(44)-68-72
25. Momoh J. A. Optimal Methods for Power System Operation and Management // PES Power Systems Conference and Exposition. IEEE, 2006, pp. 179-187. doi: 10.1109/PSCE.2006.296294
26. Varganova A.V., Panova E.A., Hatyushina T.V., Kononenko V.S., Bagaeva H.M. Development of Electrical Equipment Database of 35-220 kV for "ORU CAD". *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2018, no. 2 (39), pp. 28-33. (In Russian). doi: 10.18503/2311-8318-2018-2(39)-28-33

Варганова А.В., Ирихов А.С. Оценка надежности внешнего электроснабжения сетей 6-10 кВ с источниками распределенной генерации // Электротехнические системы и комплексы. 2021. № 3(52). С. 22-28. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28)

Varganova A.V., Irikhov A.S. Evaluation of External Power Supply Reliability in 6-10 kV Networks with Distributed Generation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2021, no. 3(52), pp. 22-28. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3\(52\)-22-28](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2021-3(52)-22-28)