ΗΑΥΚΑ

ВИЭ

Авторы: Симонов А.В.,

ООО «РТСофт-СГ», г. Екатеринбург. Россия. д.т.н. Илюшин П.В., Институт энергетических исследований Российской академии наук, г. Москва, Россия.

Simonov A.V.,

RTSoft-Smart Grid LLC. Ekaterinburg, Russia, D.Sc. Ilyushin P.V., Energy Research Institute of the Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia.

Abstract: the massive

integration of generating plants based on renewable energy sources (RES) into electric grids creates a number of problematic issues. Recently, wind farms (WFs) with wind power plants (WPPs) of various types have been integrated into the electric networks of Russia. An important task is to ensure the stable operation of the WPPs under all types of regulatory disturbances, as well as the reliable functioning of electric networks. When developing WFs construction projects,

О СОВЕРШЕНСТВОВАНИИ МЕТОДИЧЕСКИХ ПОДХОДОВ **К МАТЕМАТИЧЕСКОМУ** МОДЕЛИРОВАНИЮ ВЕТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК В ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ПРОГРАММНЫХ **ΚΟΜΠ**.ΠΕΚCAX APM CP3A И RASTRKZ

ON THE IMPROVEMENT OF METHODOLOGICAL APPROACHES TO MATHEMATICAL MODELING OF WIND POWER PLANTS IN DOMESTIC SOFTWARE PACKAGE AW RPA AND RASTRKZ

Аннотация: массовая интеграция генерирующих установок на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электрические сети поднимает ряд проблемных вопросов. В последнее время в электрические сети России интегрируются ветровые электростанции (ВЭС) с ветроэнергетическими установками (ВЭУ) различных типов. Важной задачей является обеспечение устойчивой работы ВЭУ при всех видах нормативных возмущений, а также надежного функционирования электрических сетей. При разработке проектов строительства ВЭС возникают вопросы, связанные с корректностью математического моделирования ВЭУ для выполнения расчетов токов короткого замыкания (КЗ). Это необходимо для выбора параметров настройки устройств релейной защиты (РЗ). В зарубежных программных комплексах (ПК) используются верифицированные модели ВЭУ с системами автоматического управления и защиты, позволяющие корректно учитывать их режимы работы. В отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ отсутствуют возможности для полноценного математического моделирования ВЭУ. В статье представлены предложения по совершенствованию методических подходов к математическому моделированию ВЭУ различных типов в отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ для выбора параметров настройки устройств РЗ и проведения анализа их работы. Сравнительными результатами расчетов токов подпитки места КЗ от ВЭУ подтверждена корректность упрощенного представления ВЭУ различных типов при учете их индивидуальных характеристик.

Ключевые слова: ветровая электростанция, ветроэнергетическая установка, программный комплекс, математическое моделирование, расчет токов короткого замыкания, нормативное возмущение, релейная защита.

questions arise related to the correctness of mathematical modeling of WPPs to perform calculations of shortcircuit currents (SC).

Введение

Мировой тренд развития электроэнергетики направлен на реализацию «энергетического перехода» на принципах декарбонизации, децентрализации и цифровизации [1]. При создании новых генери-

рующих установок на основе ВИЭ широко применяются инновационные технологии, а в цифровых системах автоматического управления реализуются интеллектуальные алгоритмы. Однако процесс трансформации электроэнергетики связан с воз-

E

УЛК 621.311

01 / Март 2024



виЭ

никновением ряда проблемных вопросов, требующих принятия своевременных решений [2, 3].

В соответствии с государственной программой стимулирования развития возобновляемой энергетики, которая функционирует в России с 2013 г., через процедуру заключения договоров о предоставлении мощности (ДПМ ВИЭ) осуществляется строительство новых ВЭС и солнечных электростанций (СЭС), а также малых гидроэлектростанций [4, 5].

Указанная программа предусматривает конкурсный конкурентный отбор инвестиционных проектов по строительству генерирующих объектов, функционирующих на основе ВИЭ, для их функционирования в ЕЭС России. В рамках ДПМ ВИЭ владельцу электростанции гарантируется оплата поставленной мощности в течение 15 лет, с нормой доходности на инвестированные средства на уровне 12-14% через оптовый рынок электрической энергии и мощности [6].

За последние три года в России в соответствии с программой ДПМ ВИЭ 1.0 были введены в эксплуатацию крупные ВЭС суммарной установленной мощностью 2167,69 МВт [7]. На современных ВЭС, как правило, применяются высокоэффективные ВЭУ III и IV типа. Аналогичные типы ВЭУ планируется применять при реализации программы ДПМ ВИЭ 2.0 [8].

В соответствии со Схемой и программой развития электроэнергетических систем России на 2023-2028 годы планируется ввести в эксплуатацию более 20 ВЭС суммарной установленной мощностью более 2300 МВт [9].

В настоящее время в России эксплуатируются следующие типы ВЭУ:

• І тип – с асинхронным генератором с короткозамкнутым ротором (единичная установленная мощность до 0,5 МВт);

• II тип – с асинхронным генератором с фазным ротором и дополнительным сопротивлением в цепи ротора (единичная установленная мощность до 0,5 МВт);

• III тип – с асинхронным генератором двойного питания, в котором ток на обмотку ротора подается через силовой преобразователь (единичная установленная мощность от 1 до 5 МВт);

 IV тип – с синхронным генератором, подключаемым к коллекторной сети ВЭС через инверторный преобразователь (единичная установленная мощность от 1 до 5 МВт) [10].

Анализ опыта эксплуатации действующих ВЭС позволил выявить низкое качество проработки разделов проектной документации, связанных с:

• организацией РЗ в коллекторной сети 35 кВ ВЭС [11];

• использованием в ПК расчетов электрических режимов упрощенных моделей ВЭУ III и IV типа в виде синхронных генераторов;

• неучетом периодической составляющей в токе подпитки места КЗ от ВЭУ I, II и III типа, которая быстро затухает (около 100 мс).

Ряд используемых проектными организациями допущений в процессе моделирования ВЭУ ничем не обоснован [12]. Это приводит к существенному завышению расчётных значений токов подпитки места КЗ от ВЭУ. В результате расчетные параметры настройки токовых защит (в т.ч. максимальной токовой защиты) оказываются завышенными по величине и времени срабатывания.

В результате на ВЭС и во внешней электрической сети фиксируются:

неселективная работа устройств РЗ [13];

 проблемы с обеспечением чувствительности устройств РЗ, особенно защит дальнего резервирования [14];

• излишние отключения ВЭУ IV типа функцией LVRT (Low Voltage Ride Through) инверторных преобразователей при штатной работе устройств РЗ в результате КЗ в коллекторной или внешней электрической сети;

• риски повреждения электротехнического оборудования на ВЭС [15].

Важной задачей является обеспечение устойчивой работы ВЭС в составе отечественных электрических сетей при всех видах нормативных возмущений, а также надежное функционирование самих электрических сетей при интеграции в них значительного количества ВЭС с ВЭУ различных типов [16].

Целью статьи является представление разработанных предложений по совершенствованию методических подходов к математическому моделированию ВЭУ в отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ для выбора параметров настройки устройств РЗ и проведения анализа их работы. This is necessary to select the settings of relay protection (RP) devices. In foreign software packages (SPs), verified models of WPPs with automatic control and protection system are used, allowing them to correctly take into account their operating modes. There are no opportunities for fullfledged mathematical modeling of WPPs in the domestic software packages AW RPA and RastrKZ. The article presents proposals for improving methodological approaches to the mathematical modeling of WPPs of various types in domestic software packages AW RPA and RastrKZ to select the settings of RP devices and analyze their operation. Comparative results of calculations of short-circuit charging currents from WPPs have confirmed the correctness of a simplified representation of WPPs of various types, taking into account their individual characteristics

Keywords: wind farm, wind power plant, software package, mathematical modeling, calculation of shortcircuit currents, emergency disturbance, relay protection.

НАУКА

виЭ



Симонов

Александр Владимирович В 2000 г. окончил электротехнический факультет Уральского государственного технического университета. Директор обособленного подразделения ООО «РТСофт-СГ».



Илюшин Павел Владимирович

В 1997 г. окончил факультет энергетики Новосибирского государственного технического университета. В 2020 г. в АО «НТЦ ФСК ЕЭС» защитил докторскую диссертацию на тему «Совершенствование противоаварийного и режимного управления энергорайонов с распределенной генерацией». Руководитель Центра интеллектуальных электроэнергетических систем и распределенной энергетики ФГБУН «ИНЭИ РАН».

Анализ причин некорректного математического моделирования ВЭУ

Причиной некорректного математического моделирования ВЭУ и результатов расчетов электрических режимов, в частности – токов КЗ, является использование неверифицированных математических моделей ВЭУ [17-19].

Это обусловлено следующими факторами:

1. Отсутствием отечественных ПК, позволяющих с достаточной точностью моделировать поведение ВЭУ I, II, III и IV типа при различных видах КЗ. Это в первую очередь относится к математическим моделям ВЭУ III и IV типа, поведение которых зависит от целого ряда факторов:

 параметров настройки контроллера силового (инверторного) преобразователя, реализующего функции управления и защиты ВЭУ при КЗ;

 вида анализируемого аварийного возмущения;

• удаленности аварийного возмущения от ВЭУ.

2. Отсутствием действующего нормативно-технического документа (НТД), содержащего утвержденную методику математического моделирования ВЭУ I, II, III и IV типа в отечественных ПК.

Для выполнения сравнительных расчетов использовался ПК PowerFactory DIgSILENT, позволяющий корректно моделировать поведение ВЭУ различных типов. Кроме того, была разработанная тестовая расчетная модель коллекторной сети ВЭС напряжением 35 кВ (рис. 1) с ВЭУ I, II, III и IV типа и нагрузкой [20]. Параметры тестовой расчетной модели приведены в табл. 1. *Таблица 1. Параметры тестовой расчетной модели в ПК РоwerFactory*

Ветроэнергетические установки							
Тип ВЭУ	Повышающий трансформатор 0,69/35 кВ						
ВЭУ І типа $N_{\rm ycr}$ = 0,5 МВт	$S_{\text{ном}} =$ 800 кВА						
ВЭУ II типа $N_{\rm ycr}$ = 0,5 МВт	$S_{\text{ном}} =$ 800 кВА						
ВЭУ III типа $N_{\rm ycr}$ = 5 МВт	$S_{\text{ном}} = 5600 \text{ кВА}$						
ВЭУ IV типа $N_{\rm ycr}$ = 5 МВт	$S_{\text{ном}} = 5600 \text{ кВА}$						
Электросетевые элементы							
КЛ от ВЭС до нагрузки	АПвПуг-35 3х(1х400) длиной от 0,3 до 30 км						
КЛ от ВЭС до внешней электрической сети	АПвПуг-35 3х(1х400) длиной 5 км						
Мощность нагрузки	5 + <i>j</i> 2 MBA						
Внешняя электрическая сеть (эквивалент)	S_{K3} = 800 MBA						



Рис. 1. Тестовая расчетная модель коллекторной сети ВЭС напряжением 35 кВ

Учитывая, что коллекторная сеть ВЭС напряжением 35 кВ, как правило, работает с изолированной нейтралью, то в расчетах токов КЗ моделировалось нормативное возмущение в виде трехфазного КЗ на различных расстояниях от ВЭУ ($L_{\rm K3}$ от 0,3 до 30 км). Отключения кабельных линий (КЛ) 35 кВ при КЗ осуществлялись с выдержкой времени 150 мс от момента возникновения КЗ, учитывающего время срабатывания основной защиты КЛ, а также собственное время отключения высоковольтного выключателя.

Как показали результаты расчетов электромеханических переходных процессов, периодическая составляющая тока подпитки места КЗ от ВЭУ достаточно быстро затухает – за время около 100 мс. Это может вызвать неправильное действие устройств РЗ, так как не будет обеспечена чувствительность пусковых органов РЗ, что характерно для ВЭУ III и IV типа.

В соответствии с руководством по эксплуатации терминала защит, автоматики, управления выключателем и сигнализации кабельной или воздушной линии, линии к TCH (ЭКРА.656122.036/217 0301 РЭ) время срабатывания при двукратном входном токе по отношению к уставке срабатывания, с учетом времени действия выходного реле, составляет не более 25 мс. Таким образом, для оценки правильности работы устройств РЗ, в том числе их измерительных органов, важно учитывать действующее значение фазного тока КЗ и его изменение в течение не менее 25 мс.

Поэтому при анализе электромеханических переходных процессов оценивалось действующее значение тока подпитки места K3 от ВЭУ различных типов в начальный момент времени и в момент времени 25 мс от начала K3. Результаты расчетов действующих значений тока подпитки места K3 от ВЭУ при трехфазном K3 на разных расстояниях от ВЭУ приведены на рис. 2-5.

На рис. 6 приведены обобщенные результаты расчетов электромеханических

62



Рис. 2. Результаты расчетов действующих значений фазных токов подпитки места КЗ от ВЭУ различных типов при трехфазном КЗ на расстоянии 0,3 км от ВЭУ



Рис. 4. Результаты расчетов действующих значений фазных токов подпитки места КЗ от ВЭУ различных типов при трехфазном КЗ на расстоянии 15 км от ВЭУ

переходных процессов, представленные на рис. 2-5. Важно отметить, что на рис. 6 график для ВЭУ IV типа полностью совпадает с графиком для ВЭУ III типа, поэтому показан в виде параллельной линии.

Действующие значения фазных токов подпитки места КЗ от ВЭУ разных типов в момент времени 25 мс от начала трехфазного КЗ приведены в табл. 2. Таблица 2. Действующие значения фазных токов подпитки места КЗ от ВЭУ разных типов в момент времени 25 мс от начала трехфазного КЗ

Расстояние	Действующие значения токов подпитки места К3 от ВЭУ, о.е.						
от ВЭУ до места КЗ, км	Ітип	II тип	III тип	IV тип			
3	1,9	1,6	1,0	1,0			
6	1,7	1,5	1,0	1,0			
9	1,5	1,3	1,0	1,0			
15	1,0	1,1	1,0	1,0			

Анализ рис. 6 и табл. 2 позволяет сделать следующие выводы:

 реакции ВЭУ І и ІІ типа на трехфазное КЗ частично схожи из-за наличия в их составе асинхронных генераторов, подключенных через повышающий трансфор-



Рис. 3. Результаты расчетов действующих значений фазных токов подпитки места КЗ от ВЭУ различных типов при трехфазном КЗ на расстоянии 3 км от ВЭУ







Рис. 6. Графики зависимости величин действующих значений фазных токов подпитки места К3 от ВЭУ различных типов в момент времени 25 мс от начала трехфазного К3

матор к коллекторной сети ВЭС;

• величины подпитки места K3 от ВЭУ I и II типа в момент времени 25 мс от начала K3 составляют 1,9 $I_{\rm HOM}$ и 1,6 $I_{\rm HOM}$ соответственно при близких к ВЭУ K3, но при расстоянии от ВЭУ до места K3 15 км и более снижается до $I_{\rm HOM}$;

 реакция ВЭУ III типа на трехфазное КЗ частично похожа на реакцию ВЭУ I и II типа из-за наличия асинхрон-

РЕЛЕЙНЯЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ научно-практическое издание 01 /

63

ного генератора в своем составе, однако в начальной части графика она существенно отличается из-за наличия силового преобразователя в цепи ротора, защищающего обмотку ротора от перенапряжений при близких КЗ;

• величина подпитки места КЗ от ВЭУ III и IV типа близко к значению $I_{\rm HOM}$ вне зависимости от места трехфазного КЗ.

Аналогичные результаты расчетов были получены при математическом моделировании ВЭУ различных типов в программной среде MATLAB/Simulink, представленные в [21].

Подход к математическому моделированию ВЭУ различных типов

Учитывая, что протяженность коллекторной сети на большинстве ВЭС не превышает 10–15 км, то для оценки правильности работы основных защит в коллекторной и внешней электрической сети предложено использовать расчетные действующие значения токов подпитки места КЗ от ВЭУ (табл. 2).

В отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ в настоящее время отсутствуют верифицированные математические модели ВЭУ I, II, III и IV типа, при этом имеется принципиальная особенность – при расчете периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени (сверхпереходный ток) источник тока предлагается задавать как источник напряжения в виде «ЭДС за сопротивлением», с соответствующим пересчетом параметров.

Учитывая изложенное, моделирование ВЭУ I и II типа с асинхронными генераторами в отечественных ПК APM CP3A и RastrKZ для расчетов токов K3 следует выполнять упрощенным способом, в соответствии со схемой замещения асинхронных генераторов, как показано на рис. 7 [22].

В соответствии с рекомендациями [22] параметры схемы замещения ВЭУ I и II типа можно рассчитать с использованием нижеприведенных выражений. Сверхпереходную электродвижущей силы (ЭДС) асинхронного генератора (*E*^{''}₀) в момент, предшествующий КЗ, можно определить по выражению (1):

$$E''_{0} = \sqrt{(U_{0} - I_{0}X''_{\text{reh}}\sin\varphi_{0})^{2} + (I_{0}X''_{\text{reh}}\cos\varphi_{0})^{2}}, (1)$$

где U_0 – напряжение на клеммах статора асинхронного генератора в момент времени, предшествующий КЗ (можно допустить $U_0 = U_{\text{Hom}}$);

 I_0 – ток статора асинхронного генератора в момент времени, предшествующий КЗ (можно допустить $I_0 = I_{\text{HOM}}$);

 $\cos \phi_0 - \kappa_0 = \kappa_0 + \kappa_0$ ратора в момент времени, предшествующий КЗ (можно допустить $\cos \phi_0 = \cos \phi_{HOM}$), аналогично можно допустить $\sin \phi_0 = \sin \phi_{HOM}$;

X^{′′}_{ген} – сверхпереходное сопротивление асинхронного генератора ВЭУ I и II типа.

64

$$K''_{\rm FeH} = \frac{1}{I_{\rm пуск}},$$
 (2)

где $I_{\text{пуск}}$ – пусковой ток асинхронного генератора ($I_{\text{пуск}} = 4-5$ o.e.).

Схема замещения ВЭУ III и IV типа для расчетов токов КЗ в отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ приведена на рис. 8.

Для обеспечения постоянной величины тока подпитки от ВЭУ вводится внутреннее активное сопротивление источника тока порядка 10000 Ом, существенно не влияющее на результаты и точность расчетов. Параметры схемы замещения для ВЭУ III и IV типа можно вычислить по выражениям (3) и (4).

$$E_{\rm B} = \sqrt{3} I_{\rm HOM} R_{\rm BH},$$

где *I*_{ном} – номинальный ток ВЭУ III типа (паспортные данные);

*R*_{вн} – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Для минимизации влияния места КЗ на величину тока подпитки от ВЭУ III типа введем внутреннее сопротивление источника тока, в результате чего получим: $E_{\rm BЭY} = \sqrt{3}I_{\rm HoM}R_{\rm BH} = 1,7321 \cdot 10000I_{\rm HoM} = 17321I_{\rm HOM}$.

Для обеспечения подпитки места К3 реактивной составляющей тока К3 от ВЭУ необходимо задавать угол *E*_{вэу} равный –90 градусов.

ЭДС ВЭУ IV типа определим по выражению (4):

$$E_{\rm BJy} = \sqrt{3}I_{\rm MHB}R_{\rm BH}, \qquad (4)$$

где $I_{\text{инв}}$ – максимальный возможный ток инверторного преобразователя ВЭУ, определяемый с учетом допустимой перегрузки, заданной заводом-изготовителем, как правило, $I_{\text{инв}} = (1 - 1, 2) I_{\text{ном}}$ (паспортные данные);

*R*_{вн} – внутреннее сопротивление источника ЭДС.

Для минимизации влияния места КЗ на величину тока подпитки от ВЭУ IV типа введем внутреннее сопротивление источника тока, в результате чего получим:

 $E_{\rm B3Y} = \sqrt{3}(1-1,2)I_{\rm HOM}R_{\rm BH} = 17321(1-1,2)I_{\rm HOM}.$

Для обеспечения подпитки места КЗ реактивной составляющей тока КЗ от ВЭУ необходимо задавать угол *E*_{ВЭУ} равный –90 градусов.

Сравнительные результаты расчетов периодической составляющей тока подпитки места КЗ от ВЭУ I, II, III и IV типа в тестовой схеме сети при трехфазном КЗ, выполненные в зарубежном ПК PowerFactory и отече-



Рис. 7. Схема замещения ВЭУ I и II типа для расчетов токов КЗ

Рис. 8. Схема замещения ВЭУ III и IV типа для расчетов токов КЗ

(3)

01 / Март 2024 РЕЛЕЙНЯЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ научно-практическое издание Таблица 3. Сравнительные результаты расчетов периодической составляющей тока подпитки места К3 от ВЭУ различных типов при трехфазном К3

Расстояние		Величина периодической составляющей тока подпитки места КЗ от ВЭУ, о.е.										
от ВЭУ до места КЗ, км	Ітип			II тип			III тип			IV тип		
	PF	APM CP3A	RastrKZ	PF	APM CP3A	RastrKZ	PF	APM CP3A	RastrKZ	PF	APM CP3A	RastrKZ
3	1,9	2,0	2,0	1,6	1,7	1,7	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
6	1,7	1,8	1,8	1,5	1,6	1,6	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
9	1,5	1,5	1,5	1,3	1,4	1,4	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
15	1,0	1,0	1,0	1,1	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

ственных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ, с учетом предложенного подхода, приведены в табл. 3.

Величина периодической составляющей тока подпитки места K3 от ВЭУ I, II, III и IV типа, рассчитываемой в отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ в соответствии с предложенным подходом, отличается от результатов расчетов в ПК PowerFactory с верифицированными моделями ВЭУ не более чем на 10%. Данная точность является допустимой для расчетов токов K3 и выбора уставок устройств РЗ, учитывая используемые упрощения.

Выводы

В настоящее время в России отсутствуют отечественные ПК, позволяющие выполнять полноценное математическое моделирование ВЭУ различных типов при выполнении расчетов токов КЗ при всех видах нормативных возмущений.

В отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ на текущий момент предусмотрено выполнение расчета периодической составляющей тока КЗ в начальный момент времени, т.е. сверхпереходного тока.

Отсутствие действующего НТД с утвержденной методикой математического моделирования ВЭУ различных типов в отечественных ПК приводит к их ошибочному учету в виде синхронных генераторов. Следствием чего является неселективная работа устройств РЗ, недостаточная чувствительность устройств РЗ, излишние отключения ВЭУ функцией LVRT в условиях штатной работы защит при КЗ в коллекторной или внешней электрической сети, а также риск повреждения электротехнического оборудования ВЭС.

Результаты расчетов электромеханических переходных процессов в ПК PowerFactory показали, что периодическая составляющая тока подпитки места КЗ от ВЭУ достаточно быстро затухает (около 100 мс), что может быть причиной неправильной работы устройств РЗ из-за недостаточной чувствительности пусковых органов к токам подпитки места КЗ от ВЭУ III и IV типа.

Предлагается в ПК АРМ СРЗА и RastrKZ при моделировании ВЭУ задавать источник тока в виде источника напряжения «ЭДС за сопротивлением» с соответствующим пересчетом параметров.

Сравнительные результаты расчетов периодической составляющей тока подпитки места КЗ от ВЭУ I, II, III и IV типа, выполненные в ПК PowerFactory, а также отечественных ПК АРМ СРЗА и RastrKZ, в соответствии с предложенным подходом, показали, что отличия не превышают 10%.

HAVKA

Литература:

 Тягунов М.Г. Цифровая трансформация и энергетика // Энергетическая политика. – 2021. – № 9 (163). – С. 74-85.

2. Воропай Н.И. Направления и проблемы трансформации электроэнергетических систем // Электричество. – 2020. – № 7. – С. 12-21.

1.0 1.0 1.0 1.0 3. Воропай Н.И., Губко М.В., Ковалев С.П., Массель Л.В., Новиков Д.А., Райков А.Н., Сендеров С.М., Стенников В.А. Проблемы развития цифровой энергетики в России // Проблемы управления. – 2019. – № 1. – С. 2-14.

4. Бутузов В.А., Безруких П.П., Елистратов В.В. Российская возобновляемая энергетика // Энергия единой сети. – 2021. – № 3 (58). – С. 70-77.

5. Безруких П.П. Прогноз развития возобновляемой энергетики мира на период до 2030 года // Сантехника, Отопление, Кондиционирование. – 2018. – № 9 (201). – С. 92-94.

 Постановление Правительства РФ от 28 мая 2013 года №449 «О механизме стимулирования использования возобновляемых источников энергии на оптовом рынке электрической энергии и мощности».

7. Обзор ветроэнергетического рынка в России за 2022 год. – М.: НО «Ассоциация ветроиндустрии», 2023. – 24 с.

8. Бутузов В.А., Безруких П.П., Грибков С.В. Ветроэнергетика России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2021. – № 10. – С. 38-50.

 Схема и программа развития электроэнергетических систем России на 2023-2028 годы. Утв. Приказом Минэнерго России от 28.02.2023 г. №108. [Электронный ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/node/24125 (дата обращения: 22.01.2024).

 Елистратов В.В., Кудряшева И.Г. Режимы работы установок и энергокомплексов на основе возобновляемых видов энергии: учебное пособие. – СПб.: Политех-Пресс, 2021. – 157 с.

 Илюшин П.В. Анализ влияния распределённой генерации на алгоритмы работы и параметры настройки устройств автоматики энергосистем // Энергетик. – 2018. – № 7. – С. 21-26.

 Симонов А.В., Илюшин П.В. О моделировании ветровых электростанций для выбора состава и параметров настройки устройств релейной защиты при их интеграции в распределительные сети // Энергетик. – 2020. – № 12. – С. 49-54.

 Ефремов В.А., Ефремов А.В., Петрушков М.Ю., Широкина Е.В. Особенности выполнения зацит линий при наличии ветровых электростанций // Сборник докладов международной конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем – 2021. – Том IV. – С. 43-49.

14. Нудельман Г.С., Наволочный А.А., Онисова О.А., Смирнов С.Ю. Исследования влияния ветроэлектростанции на базе асинхронного генератора двойного питания на функционирование дистанционной защиты // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – №3 (72). – С. 120-127.

 Симонов А.В., Илюшин П.В. О предотвращении отключений ветроэнергетических установок при нормативных возмущениях в прилегающей сети // Релейная защита и автоматизация. – 2021. – № 3 (44). – С. 70-75.

16. Симонов А.В., Илюшин П.В. Способы обеспечения устойчивой работы ветроэнергетических установок ветровых электростанций в составе отечественных распределительных электрических сетей // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2022. – № 3 (72). – С. 60-70.

17. Suvorov A., Razzhivin I., Evseeva A. Challenges and approaches in modeling wind power plants in electric power systems // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2135. – 020055.

18. Samsonenko D., Khudoyarov V., Rovnyagina A., Drankova A., Krylova A. Mathematical modeling of wind power plant capacity // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 677. – 042105.

 Бекиров О.С., Бекиров Э.А., Воскресенская С.Н. Методы математического моделирования характеристики мощности ветроэнергетической установки // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. – 2023. – Том 70. – № 3 (52). – С. 96-102.

20. Илюшин П.В. Требования к разгрузке при вынужденном отделении от сети электростанции с собственными нуждами и нагрузкой на напряжении 6-10 кВ // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2011. – № 6. – С. 23-27.

21. Середкин Д.Ю., Аверьянов Д.А., Булатов Р.В., Бурмейстер М.В. Оценка влияния машин двойного питания, участвующих в регулировании реактивной мощности, на параметры коротких замыканий // Международный научно-исследовательский журнал. – 2020. – № 8 (98). – Часть 1. – С. 116-131.

22. Руководящие указания по расчету токов короткого замыкания и выбору электрооборудования РД 153-34.0-20.527-98. – 35 с. 📾

РЕЛЕЙНЯЯ ЗАЩИТА И АВТОМАТИЗАЦИЯ научно-практическое издание

01 / Март 2024

65