

ВЛИЯНИЕ ОТКЛОНЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ НА ПРЕДЕЛЬНОЕ ВРЕМЯ ОТКЛЮЧЕНИЯ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПО УСЛОВИЮ УСТОЙЧИВОСТИ ГЕНЕРАТОРОВ СИСТЕМЫ

П.Ю. Губин, А.С. Тавлинцев

Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

Непостоянство сопротивлений и проводимостей передач энергосистем обуславливается целым рядом факторов: от неопределенности, вызванной метеорологическими условиями, до естественных ошибок в учете геометрии трасс электропередачи. Тем не менее однозначно судить о том, насколько эти изменения могут сказаться и сказываются на динамической устойчивости, не представляется возможным без дополнительных процедур моделирования и вычислительных экспериментов.

Цель данного исследования заключается в оценке влияния возможных отклонений параметров схем замещения линий электропередачи на переходную устойчивость генерирующего оборудования.

Для достижения поставленной цели предложено на базе простейшей трехузловой системы смоделировать случайные изменения параметров схем замещения линий электропередачи и произвести множественные расчеты переходных процессов. На первом шаге производился анализ изменения предельного времени при учете отклонений каждого из параметров в отдельности. Далее сопротивления и проводимости линий изменялись уже одновременно, а контролировались траектории параметров режима работы генератора тестовой сети. В заключение был произведен численный анализ собранных данных с целью установления характера зависимости контрольных величин и параметров схемы замещения линии.

Проведенный эксперимент выявляет две закономерности. Во-первых, существенными с точки зрения устойчивости оказываются только случайные изменения реактивного продольного сопротивления линии. Кроме того, второй этап эксперимента показывает, что с точки зрения динамического изменения параметров режима случайные изменения параметров схем приводят к существенной неопределенности и рассеиванию траекторий изменения параметров режима.

Таким образом, исследование показывает, что исключение из рассмотрения возможных отклонений параметров схем замещения в первом приближении однозначно повлияет на результаты расчетов.

Ключевые слова: параметр линии электропередачи, динамическая устойчивость, нормальный закон распределения, предельное время отключения короткого замыкания.

Введение

Управление энергосистемами всегда связано с некоторой неопределенностью. Так, никогда нельзя точно оценить уровень энергопотребления или с уверенностью говорить о параметрах режима в определенный момент времени. Факторы, подобные указанным, заставляют иначе подходить к задачам анализа режимов и расчетам переходных процессов, подходить к ним с вероятностной позиции, согласно которой во внимание принимаются возможные изменения параметров, а не рассматриваются строго определенные их значения. Такой подход действует и в рамках оценки динамической устойчивости энергосистем [10, 11].

Отдельного внимания заслуживают в этой связи попытки учесть возможные отклонения параметров линий электропередачи [6, 9, 12, 13, 15, 16]. Как известно, при создании моделей энергосистем в распоряжении инженера никогда нет однозначно точных параметров схем замещения передач, что обусловлено разными причинами: активные сопротивления вместе с активными и реактивными проводимостями зависят от загрузки элек-

тропередачи и метеоусловий, вследствие чего изменяются постоянно, в то время как реактивные сопротивления практически не подвержены случайным изменениям, а их отклонения по большей мере есть следствие естественной ошибки при оценке их длины и геометрии.

Таким образом, представляется интересным оценить влияние указанных постоянных ошибок и случайных отклонений параметров схем замещения на динамическую устойчивость генерирующего оборудования.

Вероятностные изменения параметров схем замещения линий

Для понимания того, как и почему возникают отклонения параметров линий электропередачи, следует обратиться к специализированной литературе, но прежде всего к схеме замещения линии, которая представлена на рис. 1. Известно [7], что в общем случае линия электропередачи без учета волновых свойств описывается четырьмя электрическими параметрами – продольным активным сопротивлением R_l , Ом; продольным реактивным

сопротивлением X_l , Ом; активной проводимостью на землю G_l , См; реактивной проводимостью на землю B_l , См.

Каждый из обозначенных параметров, как уже отмечалось, подвержен изменениям в ходе эксплуатации оборудования – случайным, и ошибкам в изначальной оценке величины – систематическим. Источники [2, 9] указывают на определенные диапазоны возможного изменения каждого из этих параметров, которые воспроизводятся в табл. 1. В этой же таблице указаны основные факторы, обуславливающие эти отклонения.

Из всех обозначенных источников отклонений можно попытаться однозначно численно оценить только отклонения активного сопротивления, которые описываются хорошо известной физической формулой [7]:

$$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20^\circ \text{C})], \quad (1)$$

где R_t – активное сопротивление проводника при температуре t , Ом; R_{20} – активное сопротивление проводника при температуре 20°C ; α – температурный коэффициент материала проводника, $1/\text{K}$; t – температура проводника.

Тем не менее, данная формула не есть панацея, поскольку ключевой параметр t – температура проводника – зависит от множества факторов, таких как солнечное излучение, скорость ветра, текущая токовая нагрузка передач и т. д., о чем гово-

рят специальные исследования [1]. А отклонения и возможные изменения других параметров трудно поддаются оценке, если вообще поддаются, что в особенности относится к активной проводимости на землю.

Это указывает на тот факт, что в первом приближении возможные изменения каждого из параметров могут быть описаны нормальными вероятностными распределениями, в качестве математических ожиданий которых используются рассчитанные по справочным данным величины, а дисперсии параметров оцениваются, исходя из того умозаключения, что границы диапазонов изменения параметров по сути есть тройные среднеквадратичные отклонения – 3σ . Последнее означает, что более 95 % возможных значений каждого из параметров схем замещения укладываются в диапазон отклонений, указанный в табл. 1.

В действительности нормальным распределением с высокой точностью можно описать только возможные отклонения реактивного сопротивления X_l , которые по сути вызваны ошибкой в оценке геометрии и длины линии, как отмечалось выше. Во всех других случаях необходимо дополнительное исследование вероятностного распределения отклонений параметров, связанное с анализом погодных явлений. Принятое же в дальнейшем соглашение об универсальности нормальных распределений действует только на начальном этапе исследований.

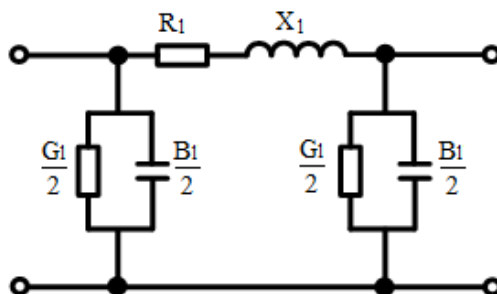


Рис. 1. Схема замещения линии электропередачи

Вероятные отклонения параметров линий электропередачи

Таблица 1

Параметр	Источник отклонения	Диапазон отклонения, %
R	Неучет поверхностного эффекта; влияние погодных условий; влияние режимных условий и загрузки	$-24 \dots +8$
X	Неточность задания геометрии и длины линии; взаимная индукция параллельных цепей	$-10 \dots +8$
G	Неточность задания геометрии и длины линии; влияние погодных условий	$-300 \dots +300$
B	Неучет стрелы провеса; влияние колебаний влажности грунта; влияние колебаний проводимости грунта	$-25 \dots +25$

Понятие предельного времени отключения короткого замыкания

Авторам исследования представляется, что такой параметр, как предельное время отключения короткого замыкания t_{lim} , может послужить индикатором влияния отклонений параметров линий электропередачи. Кроме того, данная величина активно применяется в ходе проектных и контрольных расчетов в электроэнергетике, в частности используется в анализе устойчивости генерирующего оборудования и для настройки средств релейной защиты и автоматики. Таким образом, анализ возможной ошибки при оценке этой величины может быть интересен с точки зрения проверки достоверности результатов в практической инженерной деятельности.

Предельному времени отключения короткого замыкания t_{lim} , по условию обеспечения устойчивости генерирующего оборудования соответствует максимальное время, за которое необходимо устранить короткое замыкание в системе, чтобы генератор не вышел из синхронизма и сохранил устойчивость. Методические указания по устойчивости энергосистем [8] регламентируют определенные максимально допустимые предельные времена отключения короткого замыкания, но, как прави-

ло, этот параметр определяется схемно-режимными условиями конкретной энергосистемы, а значит, напрямую зависит от параметров линий электропередачи.

Методика проведения эксперимента

Предлагается произвести серию расчетов переходных процессов на базе простейшей трехузловой системы, описание которых дано на рис. 2 и в табл. 2. В ходе этих расчетов при случайных изменениях параметров схемы замещения производятся множественные симуляции электромеханических переходных процессов, по результатам которых определяются предельные времена отключения короткого замыкания. Кроме того, с целью оценки влияния отклонений параметров схем замещения на траектории переходных процессов производится расчет параметров режимов работы генерирующего оборудования в каждый из моментов времени электромеханического переходного процесса.

Как отмечалось выше, предполагается, что отклонения параметров линии описываются нормальными вероятностными распределениями, причем не рассматриваются случайные изменения активной проводимости линий G_l . Отклонения

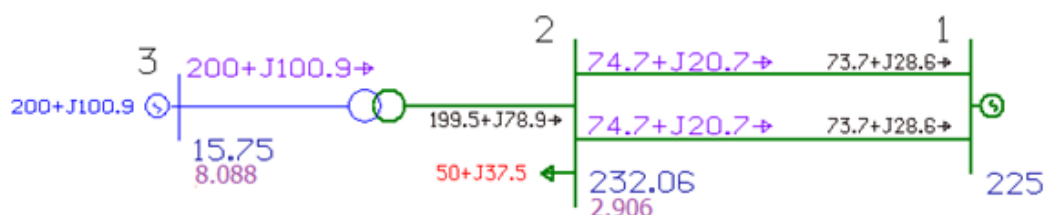


Рис. 2. Тестовая схема

Таблица 2

Параметры тестовой схемы

Узлы								
Номер	$V_{\text{ном}}$, кВ	$P_{\text{ном}}$, МВт	$Q_{\text{ном}}$, Мвар	$P_{\text{ген}}$, МВт	$Q_{\text{ген}}$, Мвар	$V_{\text{треб}}$, кВ		
1	225	0	0	−147,43	−55,57	0		
2	220	50	37,50	0	0	0		
3	15,75	0	0	200	99,14	15,75		
Ветви								
Номер начала	Номер конца	R , Ом	X , Ом	B , мкСм	$K_{\text{тр}}$, о.е.			
1	2	8,82	38,61	237,60	1,00			
1	2	8,82	38,61	237,60	1,00			
2	3	0,60	25,70	0	15,37			
Генератор								
$V_{\text{ном}}$, кВ	$P_{\text{ном}}$, Вт	$S_{\text{ном}}$, ВА	MD^2 , Т·М	x_d'' , о.е.	x_d' , о.е.	x_d , о.е.	x_q'' , о.е.	x_q' , о.е.
15,75	200	50	60	0,19	0,30	1,84	0,18	1,84
T'_{d0} , с	T''_{d0} , с	T''_{q0} , с	$T_{\text{АПС}}$, с	$T_{\text{ЦВД}}$, с	K_d , о.е.	K_U , о.е.	K_I , о.е.	Статизм, %
6,0	0,2	0,5	0,5	0,3	3	10	2	5

Таблица 3

Характеристики используемых вероятностных распределений

	Математическое ожидание, Ом	СКО, %
R , Ом	7,94	6,0
X , Ом	38,61	3,0
B , мкОм	237,60	8,3

этого параметра подвержены особенно сильным и непредсказуемым изменениям в крайне широком диапазоне и заслуживают отдельного исследования и подхода. Кроме того, предположительно этот параметр мало сказывается на переходной устойчивости. В табл. 3 приводятся используемые вероятностные параметры нормальных распределений всех варьируемых параметров схем замещения.

Поскольку линии, сопротивления и проводимости которых изменяются в ходе эксперимента, параллельны друг другу, делается допущение о том, что их параметры, несмотря на принадлежность к разным объектам, идентичны, так как линии физически находятся в одном коридоре, а значит, и наиболее влиятельный фактор – погода – оказывает на них равное влияние.

Генератор тестовой схемы описывается системой дифференциальных уравнений, в которую входят: уравнение движения, уравнение переходных процессов в обмотке возбуждения и уравнение переходных процессов в демпферных контурах [4, 5]. Также соответствующими уравнениями описываются действие автоматических регуляторов скорости (АРС) и автоматических регуляторов возбуждения пропорционального действия, а также переходные процессы в турбинах [3, 14]. Нагрузка моделируется в виде шунта, рассчитанного относительно установившегося режима в момент времени $t = 0$.

При моделировании переходных процессов в энергосистемах принято [5] моделировать короткое замыкание в виде некоторого шунта в точке замыкания, проводимость которого рассчитывается на основании схем замещения всех последовательностей. Тем не менее в конечном итоге вид короткого замыкания с точки зрения динамической устойчивости влияет только на тяжесть ава-

рийного режима и сам по себе принципиального значения не имеет – роль играет только то, насколько снизится напряжение в месте замыкания. Таким образом, чтобы абстрагироваться от конкретных видов замыканий и оценивать поведение генератора в общем, в данном исследовании в качестве аварийного сценария рассматривается короткое замыкание в узле № 2, при котором напряжение в точке замыкания снижается до 15 % от нормального уровня.

Оценка изменения предельного времени отключения КЗ

Результаты первого этапа эксперимента представлены в табл. 4 и на рис. 3, которые описывают итоги расчетов по трем сценариям, в ходе которых были произведены вычисления 1000 переходных процессов.

Полученные на первом этапе результаты позволяют говорить о том, что в наибольшей степени на величину предельного времени в частности и на результат расчета переходной устойчивости в целом влияют случайные изменения реактивного продольного сопротивления X . Этот результат закономерен – хорошо известна сильная зависимость предела передаваемой мощности и реактивного сопротивления передачи [5]. Значение стандартного отклонения для сценария, в котором изменяются только реактивные сопротивления, указывает на то, что предельное время отключения короткого замыкания может отличаться от предполагаемого на величину вплоть до 0,04 с, что значительно с позиции применения результатов анализа электромеханических переходных процессов.

Влияние активного сопротивления на оценку динамической устойчивости ограничено и в сравнении с упомянутым ранее случаем незначитель-

Таблица 4

Вероятностные характеристики предельного времени для рассматриваемых сценариев

Изменяемый параметр	$\min(t_{\text{lim}})$, с	$\max(t_{\text{lim}})$, с	$MO(t_{\text{lim}})$, с	$СКО(t_{\text{lim}})$, с
$R = \text{var}$	0,4698	0,4877	0,478	0,0030
$X = \text{var}$	0,4485	0,5029	0,478	0,0094
$B = \text{var}$	0,4765	0,4789	0,478	0,0004
$Z = \text{var}, Y = \text{var}$	0,4546	0,5038	0,478	0,0098

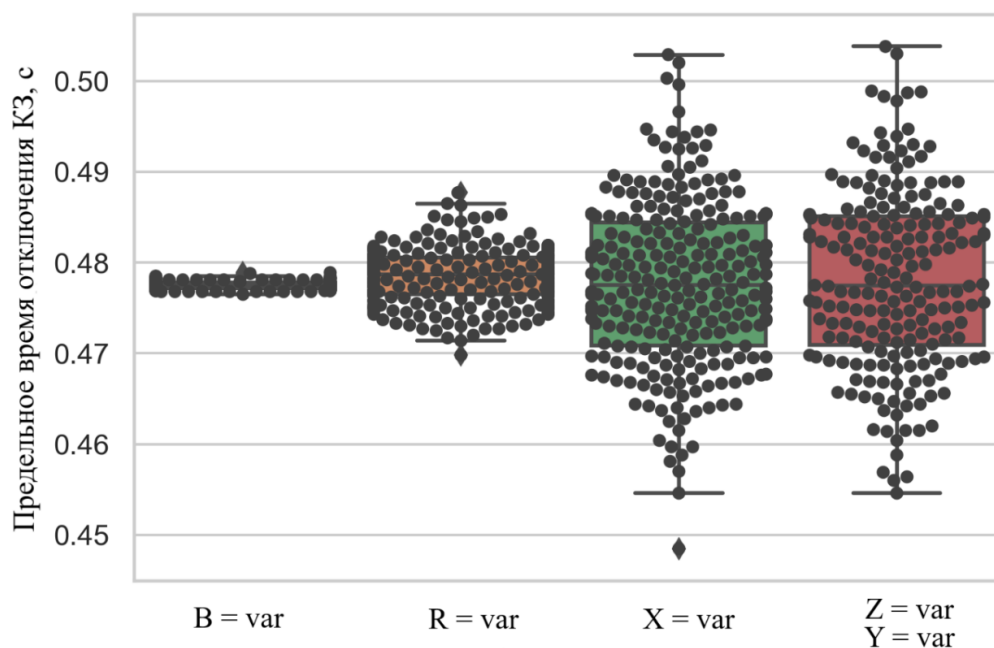


Рис. 3. Рассеяние величины предельного времени для различных сценариев: изменяется емкостная проводимость B ; изменяется активное сопротивление R ; изменяется реактивное сопротивление X ; изменяются все параметры схемы замещения

но. Еще менее существенное влияние на предельное время оказывают случайные изменения реактивной проводимости, которые, как представляется, нет никакого смысла учитывать в каких-либо расчетах.

Крайне показательным является тот факт, что для рассмотренных случаев вероятностные характеристики для сценария одновременного случайного изменения всех параметров и сценария изменения только реактивного сопротивления близки друг другу. Это позволяет при необходимости учета возможных изменений параметров принимать во внимание только изменения реактивного сопротивления X .

Оценка изменения режимных параметров генератора

Анализ траекторий изменения параметров генератора в течение переходного процесса показывает, что случайные изменения параметров схемы замещения приводят к значительной их неопределенности. Численные данные по ряду параметров генератора представлены в табл. 5, а на рис. 4 и 5 приводятся в демонстративных целях примеры совокупностей вероятных траекторий тока генератора и относительного угла его ротора.

Несмотря на сравнительно малое математическое ожидание разброса значения параметров для некоторого момента времени, пиковые значения этих же рассеяний значительны и не могут быть исключены из рассмотрения.

Вероятностные характеристики отклонения параметров

Таблица 5

Параметр режима генератора		МО разброса параметра	Максимальный разброс
δ , градус	Угол ротора	1,742	33,107
I_g , кА	Ток статора	1,005	9,326
P_e , МВт	Электромагнитная мощность	13,634	87,249
V_g , кВ	Напряжение на выводах	3,465	5,132

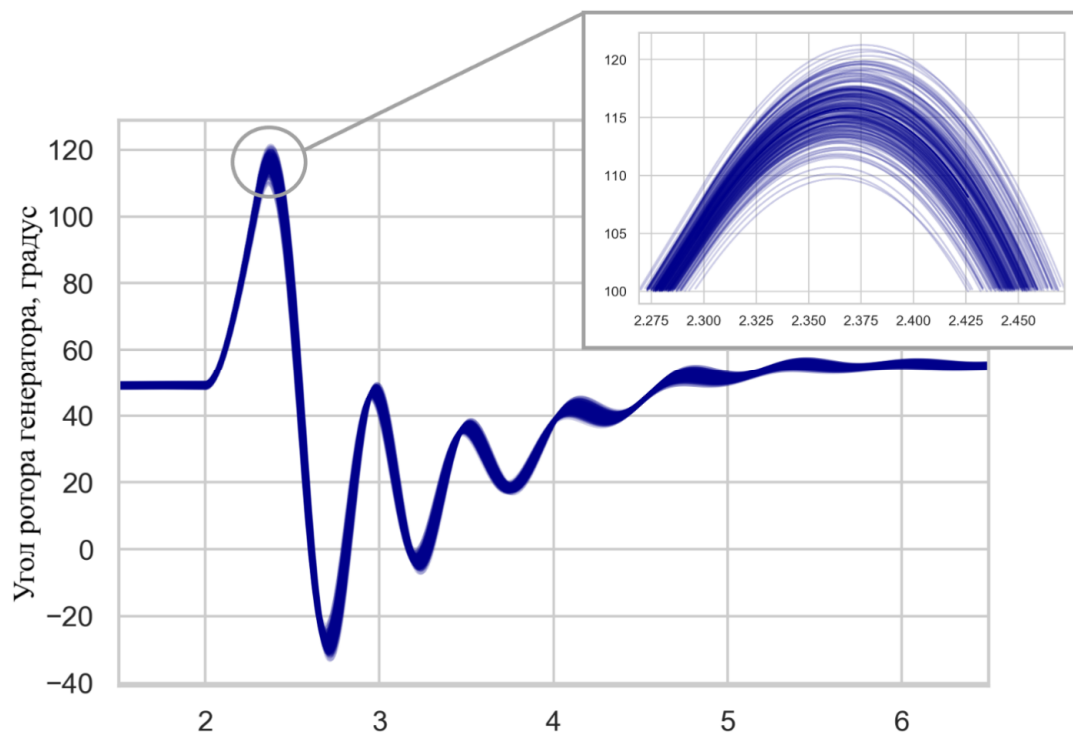


Рис. 4. Рассеяние траекторий угла ротора генератора

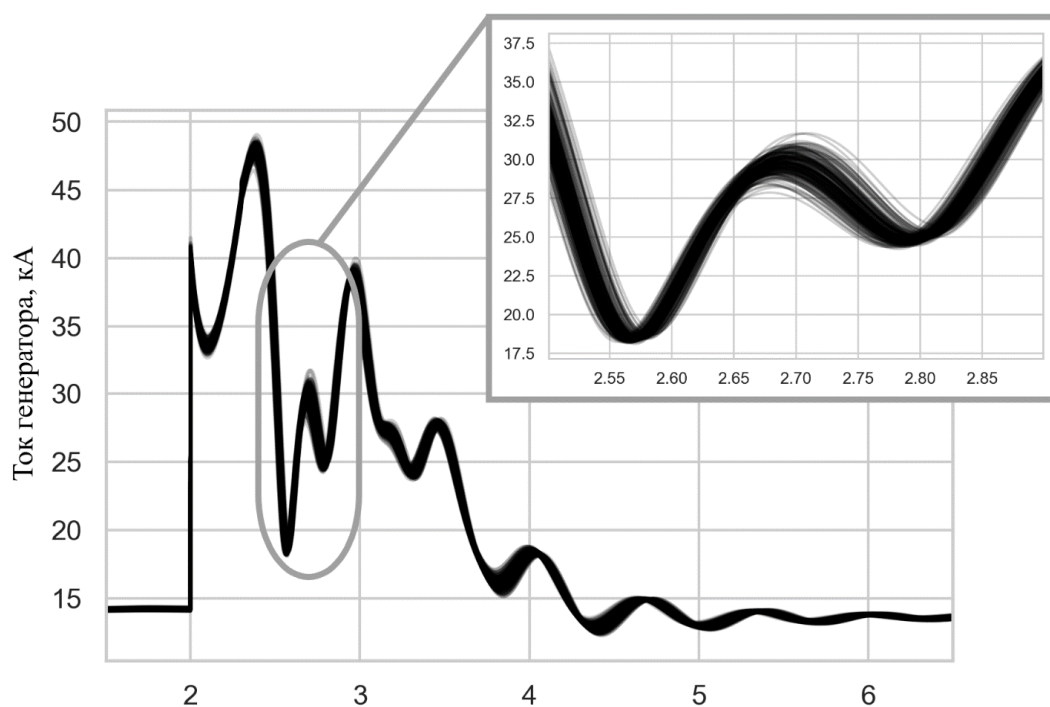


Рис. 5. Рассеяние траекторий тока генератора

Выводы

Полученные в ходе исследования результаты показательны с точки зрения влияния возможных отклонений параметров схем замещения на результаты расчетов переходных процессов. Как отклонения предельного времени от предполагаемого значения, так и рассеяние траекторий указы-

вают на то, что изменения параметров, в особенности реактивного сопротивления линий электропередачи, являются источником значительной неопределенности, которая в ряде случаев, в частности для предельного времени отключения КЗ, может приводить к существенным ошибкам в оценке устойчивости энергосистем.

Ранее было отмечено, что в отличие от активного сопротивления линий, а также проводимостей передач, которые изменяются случайно в ходе эксплуатации в зависимости от режима и состояния объектов электроэнергетики, отклонения реактивных сопротивлений носят преимущественно систематический, не случайный характер и в ходе эксплуатации изменяются мало. Это означает, что учет возможных факторов, влияющих на реактивные проводимости, при разработке моделей энергосистем, а также уточнение параметров линий электропередачи, может свести к минимуму существующую неопределенность, которая будет обуславливаться сравнительно слабым влиянием активного сопротивления.

Исследование, таким образом, не только демонстрирует особенности расчетов переходных процессов с учетом вероятной ошибки в оценке параметров линий электропередачи, но также указывает на необходимость снижения систематических отклонений реактивных сопротивлений при составлении моделей энергосистем.

В дальнейшем представляется интересным проследить выявленные закономерности на базе более крупной тестовой сети и оценить влияние тяжести коротких замыканий на неопределенность результатов оценки динамической устойчивости.

Литература

1. Ахмедова, О.О. Уточненный алгоритм расчета активного сопротивления воздушной линии электропередачи с учетом погодных условий / О.О. Ахмедова // *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. – 2016. – № 12. – С. 387–389.
2. Бердин, А.С. Формирование параметров модели ЭЭС для управления электрическими режимами / А.С. Бердин, П.А. Крючков; Урал. гос. техн. ун-т. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2000. – 100 с.
3. Веников, В.А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах / В.А. Веников. – М.: Высшая школа, 1985. – 536 с.
4. Горев, А.А. Переходные процессы синхронной машины / А.А. Горев. – Л.: Наука, 1985. – 502 с.
5. Жданов, П.С. Вопросы устойчивости электрических систем / П.С. Жданов. – М.: Альянс, 2015. – 456 с.
6. Иванов, И.Е. Аналитическое определение параметров транспонированной линии электропередачи на базе синхронизированных векторных измерений / И.Е. Иванов // *Вестник ИГЭУ*. – 2019. – №. 1. – С. 30–42. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.030-042
7. Идельчик, В.И. Электрические системы и сети / В.И. Идельчик. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 592 с.
8. Методические указания по устойчивости энергосистем. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2004. – 16 с.
9. Новиков, А.С. Влияние погрешностей информации на расчеты оптимальных режимов / А.С. Новиков, В.И. Идельчик, С.И. Паламарчук // *Известия Академии Наук СССР. Энергетика и Транспорт*. – 1981. – № 2. – С. 22–29.
10. Anderson, P. A probabilistic approach to power system stability analysis / P. Anderson, A. Bose // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1983. – Vol. 8. – P. 2430–2439. DOI: 10.1109/TPAS.1983.317742
11. Billinton, R. Probabilistic assessment of transient stability in a practical multimachine system / R. Billinton, P.R.S. Kuruganty // *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*. – 1981. – Vol. 7. – P. 3634–3641. DOI: 10.1109/TPAS.1981.316657
12. Christakou, K. Voltage control in active distribution networks under uncertainty in the system model: a robust optimization approach / K. Christakou, M. Paolone, A. Abur // *IEEE Transactions on Smart Grid*. – 2017. – Vol. 9, iss. 6. – P. 5631–5642. DOI: 10.1109/TSG.2017.2693212
13. Frank, S. Temperature-Dependent Power Flow / S. Frank, J. Sexauer, S. Mohagheghi // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2013. – Vol. 28, iss. 4. – P. 4007–4018. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266409
14. Kundur, P. Power system stability and control / P. Kundur. – New York : Mc Graw Hill Education, 2015. – 1196 p.
15. Zad, B.B. Impacts of the model uncertainty on the voltage regulation problem of medium-voltage distribution systems / B. B. Zad, J. Lobry, F. Vallee // *IET Generation, Transmission & Distribution*. – 2018. – Vol. 12, iss. 10. – P. 2359–2368. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1829
16. Zarco, P. Power system parameter estimation: a survey / P. Zarco, A. G. Exposito // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2000. – Vol. 15, iss. 1. – P. 216–222. DOI: 10.1109/59.852124

Губин Павел Юрьевич, аспирант, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; p-tul@yandex.ru, ORCID ID: 0000-0002-3736-652X.

Тавлинцев Александр Сергеевич, старший преподаватель, кафедра «Автоматизированные электрические системы», Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург; winddaes@gmail.com, ORCID ID: 0000-0003-0592-845X.

Поступила в редакцию 29 марта 2019 г.

HOW DEVIATIONS IN OPL PARAMETERS AFFECT THE STABILITY-CRITICAL FAULT CLEARANCE TIME

P.Yu. Gubin, *p-tul@yandex.ru*, ORCID ID: 0000-0002-3736-652X,
A.S. Tavlincev, *winddaes@gmail.com*, ORCID ID: 0000-0003-0592-845X
*Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
 Ekaterinburg, Russian Federation*

From weather-related uncertainty to geometrical errors of OPL design, numerous factors contribute to the variations of impedance and conductance. Still, an unambiguous judgment can be made on how such variations could affect the transient stability does require additional simulations and computational experiments.

This research seeks to evaluate how deviations in the parameters of OPL equivalent circuits could affect the transient stability of generators.

To that end, the paper proposes a primitive trinodal test system for simulating random deviations in OPL equivalent circuit parameters so as to run multiple simulations of transients. Step One is to independently analyse each parameter in terms of how it affects the critical fault clearance time. Step Two is to simultaneously measure the line conductance and impedance and to monitor the curves of the test-network generators. The final step is to computationally analyse the collected data so as to find the controlled values as a function of equivalent-circuit parameters.

Experimentation has revealed two patterns; first, only random deviations in reactance significantly affect the stability. Second, as found at Step Two, random deviations result in significant uncertainty and scatter of the parametric curves.

Thus, the research demonstrates that neglecting the possible deviations in equivalent-circuit parameters in the first approximation does affect simulation results.

Keywords: overhead line parameter, transient stability, normal distribution, critical fault clearance time.

References

1. Akhmedova O.O. [Specified Algorithm for Calculation of Overhead Line Resistance Taking into Account Meteorologic Conditions]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy* [International Journal of Engineering and Fundamental Sciences], 2016, no.12, pp. 387–389. (in Russ.)
2. Berdin A.S., Kryuchkov P.A. *Formirovaniye parametrov modeli EES dlya upravleniya elektricheskimi rezhimami* [Forming Bulk Power System Model Parameters for Power system States Control]. Ekaterinburg, GOU VPO UGTU–UPI Publ., 2000. 100 p.
3. Venikov V.A. *Perekhodnyye elektromekhanicheskiye protsessy v elektricheskikh sistemakh* [Transient Electromechanic Processes in Power Systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1985. 536 p.
4. Gorev A.A. *Perekhodnyye protsessy sinkhronnoy mashiny* [Transient Processes of Synchronous Machines], Leningrad, Nauka Publ., 1985. 502 p.
5. Zhdanov P.S. *Voprosy ustoychivosti elektricheskikh system* [Stability Issues of Power Systems]. Moscow, Al'yans Publ., 2015. 456 p.
6. Ivanov I.E. [Estimation of Synchrophasor-Based Transposed Line Parameters by Analytical Methods]. *Vestnik IGEU* [Bulletin of Ivanovo State Power University], 2019, no. 1, pp. 30–42. DOI: 10.17588/2072-2672.2019.1.030-042
7. Idel'chik V. I. *Elektricheskiye sistemy i seti* [Power Systems and Grids]. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1989. 592 p.
8. *Metodicheskiye ukazaniya po ustoychivosti energosistem* [Instructional Guideline for Power Systems Stability]. Moscow, NTS ENAS Publ., 2004. 16 p.
9. Novikov A.S. [Effect of Information Errors on optimal power flow]. *Izvestiya Akademii Nauk SSSR* [Bulletin of Academy of Sciences of the USSR], 2016, no. 2, pp. 22–29. (in Russ.)
10. Anderson P., Bose A. A Probabilistic Approach to Power System Stability Analysis. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1983, vol. 8, pp. 2430–2439. DOI: 10.1109/TPAS.1983.317742
11. Billinton R., Kuruganty P.R.S. Probabilistic Assessment of Transient Stability in a Practical Multi-machine System. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1981, vol. 7, pp. 3634–3641. DOI: 10.1109/TPAS.1981.316657

12. Christakou K., Paolone M., Abur A. Voltage Control in Active Distribution Networks under Uncertainty in the System Model: a Robust Optimization Approach. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2017, vol. 9, iss. 6, pp. 5631–5642. DOI: 10.1109/TSG.2017.2693212
13. Frank S., Sexauer J., Mohagheghi S. Temperature-Dependent Power Flow. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, vol. 28, iss. 4, pp. 4007–4018. DOI: 10.1109/TPWRS.2013.2266409
14. Kundur P. Power System Stability and Control. New York, Mc Graw Hill Education, 2015. 1196 p.
15. Zad B.B., Lobry J., Vallee F. Impacts of the Model Uncertainty on the Voltage Regulation Problem of Medium-Voltage Distribution Systems. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2018, vol. 12, iss. 10, pp. 2359–2368. DOI: 10.1049/iet-gtd.2017.1829
16. Zarco P., Exposito A. G. Power System Parameter Estimation: a Surve. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, vol. 15, iss. 1, pp. 216–222. DOI: 10.1109/59.852124

Received 29 March 2019

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Губин, П.Ю. Влияние отклонений электрических параметров электропередачи на предельное время отключения короткого замыкания по условию устойчивости генераторов системы / П.Ю. Губин, А.С. Тавлинцев // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 2. – С. 39–47. DOI: 10.14529/power190205

FOR CITATION

Gubin P.Yu., Tavlincev A.S. How Deviations in OPL Parameters Affect the Stability-Critical Fault Clearance Time. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2019, vol. 19, no. 2, pp. 39–47. (in Russ.) DOI: 10.14529/power190205