

УДК 621.316.925

И.Т. Титов¹, А.В. Бычков², Н.А. Дони²**УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОТКРЫТОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ НА ПАРАМЕТРЫ
СРАБАТЫВАНИЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ЗАЩИТЫ**Чувашский государственный университет им. И.Н. Ульянова¹
Научно-производственное предприятие «ЭКРА»²

Рассмотрены существующие подходы к расчету сопротивления электрической дуги при выборе уставок дистанционной защиты (ДЗ). Проведено моделирование участка электрической цепи с дуговым коротким замыканием (КЗ) в среде Matlab / Simulink с учетом накопленного годами теоритического опыта в исследовании открытой электрической дуги. Проведен анализ влияния параметров дуги на собственное сопротивление и определены закономерности между исследуемыми параметрами. Полученные результаты позволяют более точно учитывать переходное сопротивление при выборе уставок ДЗ по сравнению с имеющимися эмпирическими формулами, что важно для современной релейной защиты.

Ключевые слова: дистанционная защита, переходное сопротивление, открытая электрическая дуга.

Введение

Значение электрической дуги для промышленности весьма велико: достаточно упомянуть дуговые электрические печи и дуговую электросварку. В то же время для выключателей и некоторых других электрических аппаратов, электрических распределительных устройств и линий электропередачи дуга представляет собой крайне нежелательное явление, способное вызывать большие разрушения. В области релейной защиты возникающие дуговые явления могут оказать негативное влияние на ее работу. Например, на дистанционную защиту. При коротких замыканиях на линиях электропередачи среднего и высокого напряжения дистанционная защита должна точно определять сопротивление (или дистанцию) до места повреждения линии. Точное значение сопротивления определяется путем измерения напряжения и тока в начале линии – в месте установки устройств релейной защиты (УРЗ) [1]. Обычно короткие замыкания сопровождаются возникающими электрическими дугами, вносящими в контур короткого замыкания активное (как принято считать) сопротивление, поэтому при расчетах необходима оценка величины этого сопротивления [2]. Существующие подходы расчета сопротивления [3-5] заключаются в усреднении множества параметров и потому не всегда позволяют получить значение, близкое к истинному.

Расчет параметров ДЗ

Сопротивление электрической дуги в схеме замещения электрической цепи при КЗ находится в месте повреждения. При выборе уставок быстродействующих ступеней ДЗ в направлении R необходимо учитывать активное сопротивление воздушной линии (ВЛ) или кабельной линии (КЛ), а также переходное сопротивление в месте короткого замыкания, которое включает в себя сопротивление дуги [3].

Наличие переходного сопротивления в месте повреждения напрямую влияет на замер сопротивления ДЗ. На рис. 1 изображена характеристика срабатывания ДЗ и отмечена точка КЗ – $Z_{КЗ}$. В случае металлического КЗ замер сопротивления совпадает с этой точкой (1):

$$Z_{изм} = Z_{КЗ}. \quad (1)$$

Наличие переходного сопротивления при КЗ на линии смещает замер сопротивления вправо на величину ΔZ_{Π} , которая в случае линии, работающей в режиме холостого хода равна R_d (2):

$$Z_{\text{изм}} = Z_{\text{КЗ}} + R_d, \quad (2)$$

что может привести к неправильному действию ДЗ. Это ведет к необходимости учета сопротивления дуги при выборе установок ДЗ.

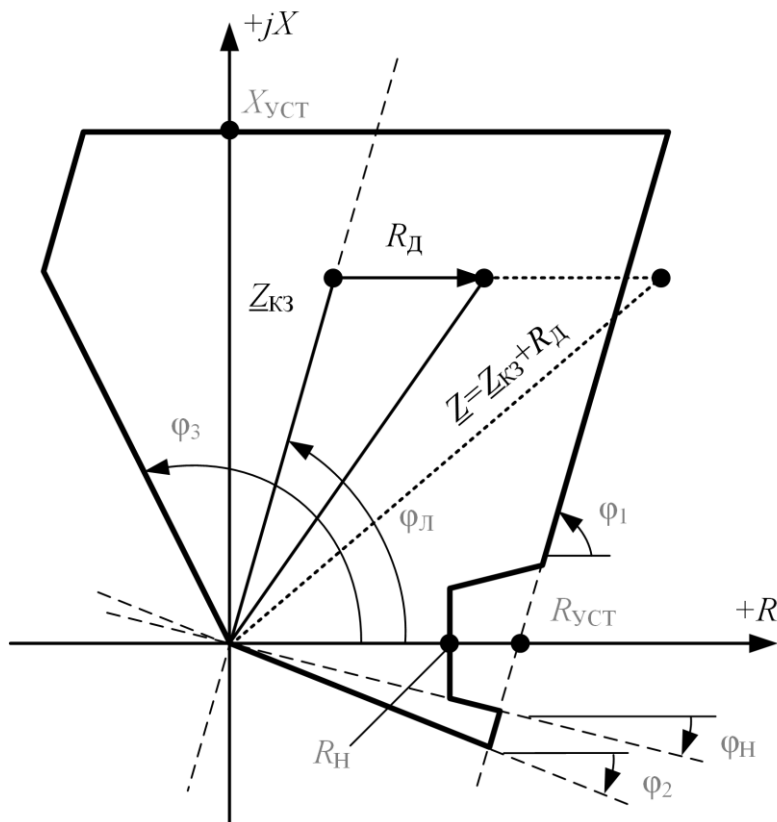


Рис. 1. Характеристика срабатывания ДЗ

Электрическая дуга характеризуется следующими основными параметрами: градиент напряжения в створе дуги (E , В/м); постоянная времени дуги (τ , с); длина дуги (l_d , м); ток дуги (I_d , А). Одной из важнейших зависимостей, характеризующих электрические свойства дуги, является вольт-амперная характеристика (ВАХ) [6]. Процесс горения дуги является не только нелинейным, что выражается в нелинейности ее ВАХ, но и нестационарным, так как длина дуги изменяется во времени из-за действующих на нее сил: электродинамических, ветра.

Оценить величину сопротивления дуги можно по эмпирическим формулам. В литературе встречаются различные подходы к расчету переходного сопротивления дуги (3):

$$R_d = 1050 \frac{l_d}{I_d} - \text{в России [4]},$$

$$R_d = 2500 \frac{l_d}{I_d} - \text{в Германии [3]},$$

$$R_d = 28700 \frac{l_d}{I_d^{1.4}} - \text{в США [5]},$$

где l_d – длина дуги, [м];

I_d – действующее значение тока, [А].

Переходное сопротивление дуги R_d является средним значением за определенный промежуток времени. Однако для исследований и проведения анализа работы быстродействующих УРЗ необходимо знать мгновенные значения сопротивления дуги, т.е. функциональную зависимость изменения сопротивления во времени $R_d = f(t)$.

Модель электрической дуги

Рассмотрение вопросов влияния переходного сопротивления дуги в месте КЗ на работу релейной защиты возможно только путем моделирования переходных процессов в электрической сети совместно с решением дифференциальных уравнений открытой электрической дуги.

Электрическая дуга, образующаяся в установках высокого напряжения и, в частности, на линиях электропередачи, представляет собой самостоятельный разряд в воздухе при атмосферном давлении между металлическими электродами. Необходимая эмиссия электронов здесь обеспечивается высокой температурой катодного пятна, а приэлектродные падения напряжения из-за значительной длины дуги не играют существенной роли. Определяющим для такого рода «длинных» дуг является так называемый положительный столб дуги. Диапазон токов дуги охватывает широкую область значений от 10^{-3} до 10^4 А и более. Основные результаты многочисленных работ по электрическим дугам, изложенные в обобщающих монографиях [7-9], охватывают элементарные процессы, теорию термической плазмы, теорию столба дуги и приэлектродных областей. Хотя накопленный экспериментальный материал очень велик, однако основные измерения были выполнены с угольными дугами, с небольшой величиной тока, спокойный характер горения которых облегчает постановку опытов. Дуги со значительными токами между металлическими электродами для удобства анализа приходилось стабилизировать, что делало их существенно отличными от представляющей здесь интерес открытой электрической дуги.

Столб дуги как целое принято анализировать в виде каналовой модели определенного радиуса с постоянным значением температуры и имеющей зону с температурой, постепенно приближающейся к температуре окружающего пространства, в которой происходят потери энергии. Подобная идеализация основана на том, что внутри столба дуги перемешивание плазмы облегчено высокой температурой и соответственно низкой плотностью, а также тем обстоятельством, что на «поверхности» дуги имеет место резкий спад проводимости, определяемый степенью ионизации, существенно зависящей от температуры газа.

Если предварительно принять допущение об изменении температуры в переходной зоне, определяющей рассеяние энергии в форме теплопроводности, то результатом такого рассмотрения является вольт-амперная характеристика дуги, т.е. зависимость напряжения вдоль столба дуги от ее тока. Экспериментальное определение вольт-амперной характеристики открытой электрической дуги связано с рядом трудностей, обусловленных главным образом неустойчивостью столба, стремящегося свернуться в спираль. Следствием этого является петлеобразование, происходящее со скоростями, близкими к скорости звука.

Одно из первых научных исследований дуги [10] ставило своей целью определение критической длины дуги с помощью вольт-амперной характеристики в диапазоне 10-1000 А, но указанные выше препятствия не позволили установить необходимые численные соотношения с достаточной точностью. Позднее Ю.В. Буткевичу [11] в отдельных случаях удавалось достигнуть при помощи той же методики лучших результатов.

В основу этих двух исследований была положена предпосылка, что при переменном напряжении в момент максимума тока дугу переменного тока можно приближенно рассматривать как дугу постоянного тока. Для этого момента времени вычисляется ток, а по нему по вольт-амперной характеристике определяется градиент напряжения горения дуги, кото-

рый затем сопоставляется с действительным градиентом напряжения на дуге, близким в момент гашения к градиенту холостого хода установки. Этот метод требует достоверных данных о вольт-амперной характеристике дуги, особенно в области относительно малых токов. Такие данные были получены А.С. Майкопаром [12, 13] на специальной опытной установке.

В области весьма больших токов имеются данные Штрома [14] для дуги длиной 30- 120 см, образующаяся между латунными электродами. Эти данные имеют существенный разброс, однако в значительном диапазоне они совпадают с результатами Бургсдорфа [15].

Следующая серия опытов Итона, Пека и Данхэма [16] выполнена для дуги длиной 30 см между латунными электродами при токах 50 А. Наконец, для токов порядка 1-10 А имеются данные А.М. Залесского [17] и Сьютса [18]. При построении вольт-амперной характеристики приведенные выше результаты могут быть объединены, что позволяет иметь непрерывную зависимость в широком диапазоне токов. Полученная обобщенная ВАХ приведена на рис. 2.

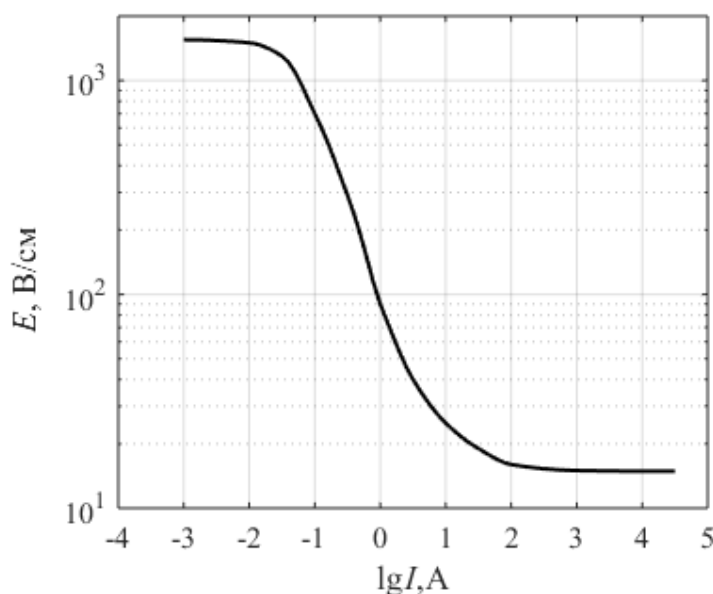


Рис. 2. ВАХ электрической дуги в воздухе при атмосферном давлении

Динамическое состояние дуги описывается уравнением (4):

$$\frac{dQ}{dt} = Ei - W, \quad (4)$$

где Q – теплосодержание единицы длины столба дуги, [ВА·с/м];

E – градиент напряжения дуги, [В/м];

i – ток дуги, [А];

t – время, [с];

W – мощность, рассеиваемая столбом дуги на единицу длины, [ВА/м].

Решение уравнения (4) зависит от механизма теплоотдачи от столба дуги: тепловое излучение, теплопроводность, свободная конвекция. Если рассматривать электрическую дугу в установившемся режиме, то согласно [19], теплоотдача излучением составляет лишь 5-10 % от общей теплоотдачи и ее можно не учитывать.

Теплоотдача теплопроводностью характерна для открытой электрической дуги с относительно небольшими токами (1-50 А), в условиях слабых конвективных потоков. Данная область описывается дифференциальным уравнением электрической дуги типа Майера и используется для определения условий самопогасания дуги [20].

Первая и вторая ступени ДЗ имеют малую выдержку времени на срабатывание, поэтому их работа происходит в начальные моменты времени КЗ. Токи КЗ при этом максимальны. В этом случае для дуги характерна теплоотдача конвекцией, когда сам столб дуги

создает вокруг себя конвективные потоки, охлаждающие канал дуги. Согласно экспериментально полученной ВАХ дуги, рисунок 2, теплоотдача конвекцией (область III) характерна для дуг с токами 100-20000 А, рис. 3 [19].

При больших токах градиент напряжения в дуге практически постоянный и он равен 15 В/см. При токах 0,1-100 А наблюдается падающий характер ВАХ, а при токе менее 0,1 А происходит постепенное замедление роста кривой и переход к неизменному градиенту 1,5 кВ/см для токов 0,05-0,001 А. При еще меньших токах формирование дуги затрудняется недостаточным разогревом электродов.

Природа изгибов ВАХ в области 100 и 0,1 А объясняется условиями отвода энергии столбом дуги.

При отдаче тепла от столба дуги свободной конвекцией уравнение (4) принимает вид (уравнение Касси) [21] (5):

$$-\frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{E^2}{E_0^2} - 1 \right), \quad (5)$$

где R – сопротивление единицы длины столба электрической дуги, [Ом/м];

τ – постоянная времени, [с];

E_0 – характеристический градиент напряжения столба дуги, [В/м];

E – мгновенное значение градиента столба дуги, [В/м].

Примечание – значения τ , E_0 определяются экспериментально и приводятся в [19].

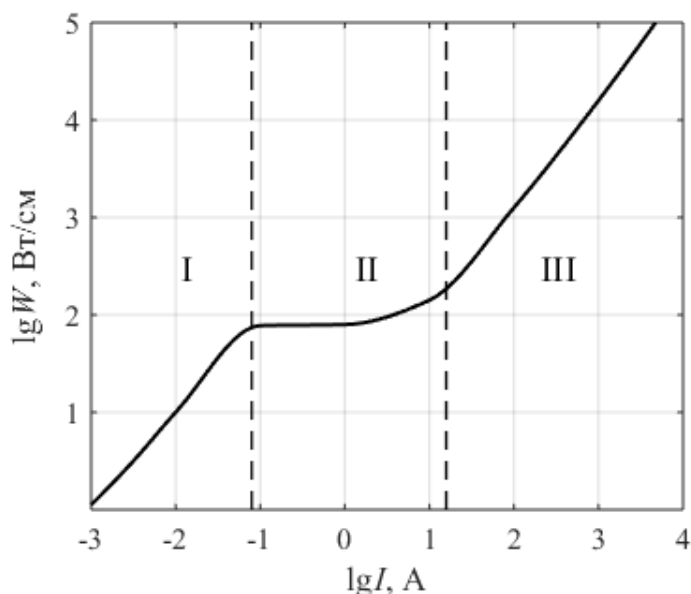


Рис. 3. Мощность, рассеиваемая дугой в зависимости от тока дуги и виды теплоотдачи. I – свободная конвекция (4000 К), II – теплопроводность (~6000 К), III – свободная конвекция (~6500 К)

Подставив в выражение (5) значение $E = iR$, получим уравнение типа Бернулли (6):

$$\frac{dR}{dt} - \frac{1}{\tau} R = -\frac{i^2}{\tau E_0^2} R^3. \quad (6)$$

Интегрируя с заменой переменных, [22] получим линейное дифференциальное уравнение первого порядка (7):

$$\frac{dr}{dt} + \frac{2}{\tau} r = \frac{2}{\tau E_0^2} i^2 \quad (7)$$

и его решение (8):

$$r = e^{-\frac{2}{\tau}t} \left[\frac{2}{\tau E_0^2} \int i^2 e^{\frac{2}{\tau}t} dt + C \right]. \quad (8)$$

Раскрывая скобки, необходимо обратить внимание на слагаемое с постоянной интегрирования уравнения (8). Учитывая скорость затухания функции $Se^{-\frac{2}{\tau}t}$ при значении $\tau = 0,85 \cdot 10^{-3}$ с, будем пренебрегать данным слагаемым [19], а также будем иметь в виду, что сопротивление дуги при $t = 0$ часто равняется нулю (наброс, атмосферный разряд, схлест проводов и т.д.).

Зная мгновенное сопротивление электрической дуги можно определить его среднее значение. Для синусоидального тока, получим следующее выражение (9):

$$R_{\text{ср}} = 2200 \frac{l_{\text{д}}}{I_{\text{д}}}. \quad (9)$$

Формула (9) является приближенной, так как в расчетах не учитывалась теплоотдача излучением и теплопроводностью. Экстремальные значения $R_{\text{ср}}$: $R_{\text{мин}} = 1070 \frac{l}{I_{\text{д}}}$;

$$R_{\text{макс}} = 8160 \frac{l}{I_{\text{д}}}.$$

Однако минимального, максимального и промежуточного значения сопротивления дуги не всегда достаточно при решении реальных практических расчетов релейной защиты.

Исследования зависимости сопротивления дуги от различных параметров, таких как длина дуги, ток дуги, напряжение источника проводились в среде имитационного моделирования Simulink [23, 24]. Модель электрической дуги описывалась уравнением дуги типа Кассии. Постоянные величины, входящие в дифференциальное уравнение, выбирались по экспериментальной ВАХ (рис. 2) [19]. Поскольку действие релейной защиты происходит в начальные моменты КЗ, когда ток дуги значителен, характеристический градиент дуги примем равным $E_0 = 15$ В/см. Так как большинство дуговых замыканий происходит при перекрытии изоляторов, минимальная длина дуги выбиралась по количеству и строительной высоте самих изоляторов. Следует отметить, что при расчете начальной длины дуги для учета ее формы следует брать длину изолятора с запасом 50 % [3].

Результаты расчетов

Исследование проводилось на имитационной модели воздушной ЛЭП при однофазном КЗ. Одновременно с замыканием, мгновенные значения тока пересылались в подпрограмму решения дифференциального уравнения дуги. Результатом такого совместного моделирования является функциональная зависимость изменения сопротивления дуги во времени. В процессе моделирования функция $R_{\text{д}} = R(t)$ играет роль переходного сопротивления, так как входит в контур КЗ. На рис. 4 приведена полученная при совместном решении уравнения дуги и режима модели энергосистемы динамическая ВАХ дуги, начальная длина которой $l_{\text{д}} = 0,7$ м.

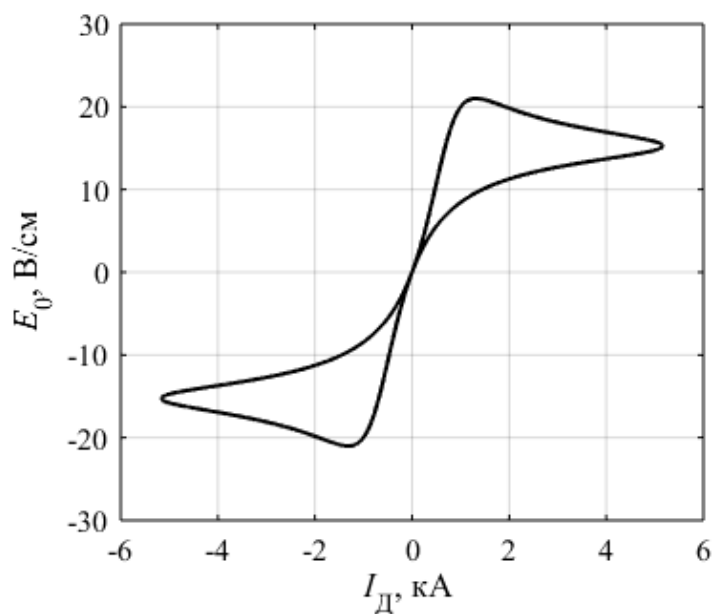


Рис. 4. Динамическая ВАХ открытой электрической дуги

На практике встает вопрос о выборе уставок ДЗ. Для более точной отстройки от переходного сопротивления дуги, зная отношение $I_{д}/l_{д}$, по рис. 5 можно определить среднее сопротивление на дуге при синусоидальном токе, где $l_{д}$ — начальная длина дуги, м; $I_{д}$ — ток дуги, А.

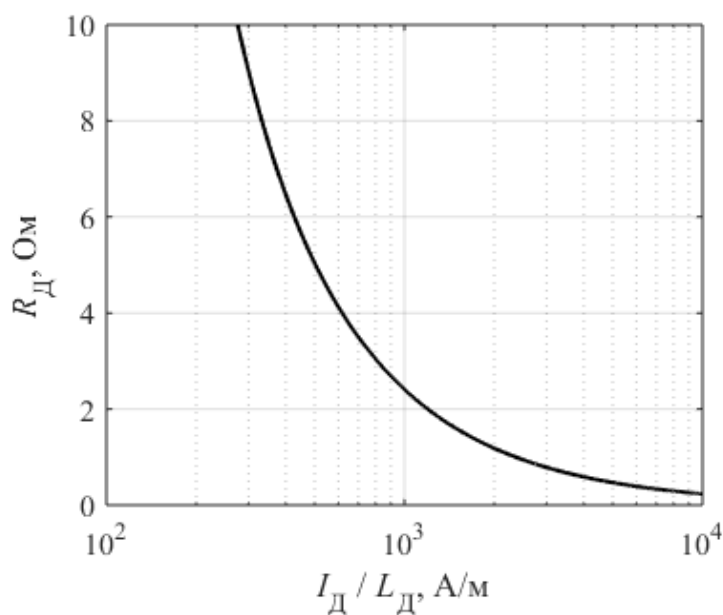


Рис 5. Диаграмма сопротивлений при различных соотношениях $I_{д}/l_{д}$, полученная при моделировании

Для сравнения в табл. 1 приведены примеры расчетных коэффициентов для уравнений (3).

Таблица 1

Результаты моделирования

$l_d, \text{ м}$	$I_d, \text{ А}$	$R_{cp}, \text{ Ом}$	K	I_d / l_d
0,3	3741,0	0,188	2338,13	12470,00
0,7	3644,0	0,451	2345,69	5205,71
1,5	3446,0	1,028	2361,66	2297,33
3,0	3063,0	2,357	2405,99	1021,00
6,0	2253,0	6,943	2607,25	375,50

Примечание – K – коэффициент в уравнениях (3)

Анализируя полученные зависимости можно отметить, что, используемые выражения (3), согласуются с данными, полученными при моделировании электрической дуги. Однако результаты моделирования на рис. 5 позволяют более точно определить среднее сопротивление дуги в широком диапазоне длин и токов дуги.

Выводы

1. Совместный процесс решения дифференциальных уравнений электрической дуги и моделирования аварийных режимов энергосистем позволяет провести анализ влияния переходного сопротивления дуги на работу релейной защиты.

2. Данный подход позволяет построить зависимости средних значений сопротивлений, по которым возможно более точное определение сопротивления электрической дуги, чем по выражениям (3) при расчетах параметров ДЗ.

Библиографический список

1. Колесов, Л.М. Выполнение ступени дистанционной защиты с использованием информации о токах питающих концов линии с ответвлением / Л.М. Колесов, В.В. Можухина // Вестник ИГЭУ. – 2019. – №4. – С. 44-53.
2. Гарке, В.Г. Расчет уставок современной дистанционной защиты / В.Г. Гарке, Е.А. Конова // Релейная защита. – 2011. – №3. – С. 50-56.
3. Циглер, Г. Цифровая дистанционная защита: принципы и применение / Г. Циглер. – М.: Энергоиздат. 2005.
4. Федосеев, А.М. Основы релейной защиты / А.М. Федосеев. – ГЭИ, 1961.
5. Walter, M. Der Selektivschutz nach dem Widerstandsprinzip; Verlag Von Oldenbourg, Munchen / M. Walter. – Berlin, 1933 (in German).
6. Lu, Q. Analysis of the Effects of Arc Volt-Ampere Characteristics on Different Loads and Detection Methods of Series Arc Faults / Q. Lu, Z. Ye, Y. Zhang, T. Wang, Z. Gao // J. Energies. – 2019. – № 12(323). – P. 1-16.
7. Энгель, А. Физика и техника газового разряда / А. Энгель, М. Штеенбек. – ОНТИ, 1935.
8. Weizel, W. Theorie Electricischer Bogen und Funken / W. Weizel, R. Rompe, Leipzig, 1949.
9. Финкельбург, В. Электрические дуги и термическая плазма / В. Финкельбург, Г. Меккер. – Издательство иностранной литературы, 1961.
10. Третьяк, Г.Т. Открытые дуги переменного тока в установках высокого напряжения / Г.Т. Третьяк, Е.Л. Кондор, В.В. Каплан // Труды Всесоюзной электротехнической ассоциации. – №1. – 1935.
11. Буткевич, Ю.В. Гашение открытой дуги переменного тока в установках высокого напряжения / Ю.В. Буткевич // Электричество. – №3. – 1950.
12. Майкопар, А.С. Гашение открытой электрической дуги / А.С. Майкопар // Электричество. – №4. – 1960.

13. Майкопар, А.С. Электрическая дуга с током 10^{-3} - 10^1 А и перекрытие загрязненной изоляции / А.С. Майкопар // Электричество. – №12. – 1964.
14. Strom, A. Long 60-cycle arcs in air / A. Strom. El. Eng. – № 3. – 1946.
15. Бургсдорф, В.В., Открытые электрические дуги большой мощности / В.В. Бургсдорф, // Электричество. – №10. – 1948.
16. Eaton, J. Experimental studies of arcing faults on a 75 kV transmission system / J. Eaton, J. Peak, J. Dunham // Tr. AIEE. 1931. – P. 1469.
17. Залесский, А.М. Исследование вольтовой дуги переменного тока / А.М. Залесский // Вестник электротехники. – №6. – 1930.
18. Suits, C. High pressure arcs in free convection / C. Suits // Phys. Rev. – №6, 1939.
19. Майкопар, А.С. Дуговые замыкания на линиях электропередачи / А.С. Майкопар // Энергия, 1965.
20. Гарке, В.Г. К вопросу о сопротивлении электрической дуги / В.Г. Гарке // Изв. АН ЛССР, серия физ. и техн. наук. – №1. – 1971.
21. Cassie, A. Arc rupture and circuit severity: a new theory / A. Cassie // Bd. And Allied Ind., Res Association, G/X-179, 1939.
22. Анго, А. Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1964.
23. Merkushev, A. Implementation of electric arc model in Simulink/SimPowerSystems / A. Merkushev, J. Triaskin // 2014 International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). 2014. DOI: 10.1109/ICCTPEA.2014.6893310.
24. Ghiormez, L. Parameters influence in electric arc modeling / L. Ghiormez, O. Prosteau // 2013 IEEE 8th International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), 2013. – DOI: 10.1109/SACI.2013.6608969.

*Дата поступления
в редакцию: 23.01.2020*

I.T. Titov¹, A.V. Bychkov², N.A. Doni²

TAKING INTO ACCOUNT THE INFLUENCE OF THE OPEN ELECTRIC ARC ON THE REMOTE PROTECTION OPERATION PARAMETERS

Chuvash State University n.a. I.N. Ulyanov¹
Research and production enterprise EKRA²

Purpose. For short circuits on medium and high voltage power lines, the remote protection must accurately determine the resistance (or distance) to the short circuit location. Usually, short circuits are accompanied by electric arcs that occur and introduce an active resistance into the short circuit; therefore, it is necessary to estimate the value of this resistance. However, the existing empirical formulas for calculating these resistances differ in scientific sources. The purpose of this article is to derive and refined dependence of the electric arc resistances on some of its parameters, which will allow for more accurate consideration of the arc resistance when calculating remote protection settings.

Methodology. The study uses the Matlab/Simulink, which simulates arc short circuit on a power line. The arc short circuit model is based on solving the differential equations of an open electric arc together with the modeling of emergency modes of the power system. The simulation model is constructed under the condition that the arc column as a whole is considered as a model of a certain radius with a constant temperature value and having a zone with a temperature gradually approaching the ambient temperature in which energy losses occur.

Findings. The results of joint modeling of the electric arc and emergency modes of the power system is a functional dependence of the arc resistance change over time.

Value. The results obtained in the simulation are consistent with the general theory of the open electric arc, which confirms the relevance of this approach in the study of physical processes that occur during arc short circuits. In addition, the results obtained allow us to more accurately calculate the parameters of remote protection in comparison with existing empirical formulas, which is important for modern relay protection.

Key words: remote protection, transfer resistance, the open electrical arc.