

УДК 621.311

DOI 10.46960/2658-6754_2020_2_74

В.И. Бирюлин, Д.В. Куделина**МОДЕРНИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ НЕЧЕТКОГО ВЫВОДА
ДЛЯ ОЦЕНКИ ТЕКУЩЕГО СОСТОЯНИЯ ИЗОЛЯЦИИ
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ**

Юго-Западный государственный университет

Рассматриваются вопросы оценки состояния изоляции кабельных линий электрических сетей. Для оценки состояния изоляции предложено использовать модернизированную систему нечеткого логического вывода. Система обеспечивает получение численных значений выходного параметра и промежуточных нечетких переменных, что позволяет получать более обоснованные результаты по сравнению с оценкой на основе значений только выходного параметра.

Ключевые слова: изоляция, нечеткие значения, нечеткие множества, силовые кабели, экспертные оценки.

I. Введение

Для построения электрических распределительных сетей как на промышленных предприятиях, так и в населенных пунктах, широко используются кабельные линии (КЛ) различного класса напряжений. При работе электрических сетей на изоляцию силовых кабелей непрерывно воздействуют различные факторы. В результате действия данных факторов в диэлектрических материалах изоляции имеют место различные физические и химические процессы. С течением времени их протекание вызывает снижение электрической прочности изоляции и в конечном итоге – ее пробой [1]. Указанные негативные факторы можно разделить на три категории.

В первую категорию факторов входят: глубина, на которой находятся силовые кабели в траншее; конфигурация трассы прохождения КЛ; механические и другие свойства грунтов вдоль трассы КЛ; наличие или отсутствие точек пересечения КЛ как с другими инженерными сетями, так и с транспортными сооружениями и дорогами. Известны результаты, приведенные, например, в [2-3], из которых видно, что действие данных факторов при определенных обстоятельствах усиливает негативные процессы в изоляции силовых кабелей: возникают повреждения из-за перемещений грунта при больших сезонных изменениях температуры грунта и связанных с этим разрывающих усилий на КЛ, расположенные в траншеях.

Вторая категория факторов объединяет разнообразные воздействия, возникающие непосредственно при эксплуатации. К ним можно отнести постепенное снижение сопротивления изоляции, возникновение частичных разрядов, тепловое воздействие на материалы изоляции токов в жилах кабелей в различных режимах работы, в том числе ненормальных и аварийных. Итоги воздействия всех этих факторов трудно определить из-за сложности контроля состояния диэлектрических материалов изоляции по всему ее объему.

В процессе эксплуатации КЛ имеется вероятность появления механических повреждений изоляции кабелей из-за проведения различных строительных и ремонтных работ. Конечно, для проведения таких работ должно выполняться согласование с организациями, эксплуатирующими электросети, но как показывает практика, это не всегда выполняется и приводит к повреждению кабелей. Следует обратить внимание, что скорость развития процессов необратимых негативных изменений в изоляционных материалах может существенно зависеть от конфигурации рассматриваемой схемы электроснабжения. Согласно результатам исследований [1, 3, 4], промежутки времени изоляции кабелей от момента ввода в работу до появления пробоя изоляции у кабелей, расположенных на верхних уровнях электрических сетей, заметно короче (около 186 календарных месяцев), по сравнению с КЛ на нижних уровнях (примерно 200 календарных месяцев). Такое соотношение объясняется тем, что по КЛ верхних уровней электросети протекают токи КЗ с большими значениями, чем на других участках.

Третья категория включает факторы, обусловленные уровнем квалификации и характером мотивации персонала, непосредственно работающего на рассматриваемых КЛ как при монтаже, так и при эксплуатации.

II. Постановка цели и задач исследования

Таким образом, задача определения текущего состояния изоляции КЛ или же получения ее оценки имеет сложный характер из-за неопределенности исходной информации. Решение задачи затрудняется также неоднозначностью во взаимных зависимостях между параметрами работы КЛ и внешними проявлениями возникновения и развития дефектов изоляционных материалов. Для получения обоснованной оценки текущего положения изоляции силовых кабелей необходима и экспертная оценка воздействия тех или иных негативных факторов. Все это ограничивает возможности применения существующих методов, рассчитанных на обработку исходной количественной информации. Следовательно, сложность создания математических моделей оценки текущего положения изоляции си-

ловых кабелей объясняется наличием большого количества разнообразных причин снижения электрической прочности изоляции.

III. Материалы и методы

Решение схожих проблем, появляющихся в ходе исследований сложных организационно-технических систем, успешно производится с применением математического аппарата нечеткого моделирования [5]. Сегодня такой способ моделирования сложных систем представляет собой один из наиболее эффективных подходов при рассмотрении сложных систем [5], в том числе, и электроэнергетических. Применение нечетких моделей для разрешения схожих задач является очень продуктивным [6-8]. Для решения задач с исходной информацией, выраженной в количественном и качественном виде, а также учитывая неполноту и неопределенность в этих данных, используется система нечеткого логического вывода (СНЛВ) [9-11].

IV. Результаты исследования

В [12] предложена СНЛВ для оценки положения изоляции силовых кабелей. Данная система представляет все имеющиеся причины снижения электрической прочности изоляции контролируемой КЛ в виде некоторой логической системы. Эта система определяется четырьмя компонентами [13]:

$$M = \langle T, P, A, B \rangle, \quad (1)$$

где T – набор рассматриваемых в системе базовых элементов; P – совокупность используемых синтаксических правил; A – набор принятых заранее аксиом; B – созданные при разработке модели правила получения выходных значений.

Во входной информации для этой СНЛВ проявляются факторы, приводящие к снижению электрической прочности изоляции КЛ. Выходное значение СНЛВ представляет собой оценку текущего состояния изоляционных материалов. Такая СНЛВ является MISO-системой, использующей большое количество (n) входных переменных и одну выходную переменную. В данном случае система имеет число входов, соответствующее количеству исходных переменных, один выход для нахождения величины оценки текущего состояния изоляции и реализуется с применением алгоритма Мамдани. Данные системы создают следующее отображение:

$$y = f(x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n), \quad (2)$$

где y – выходное значение СНЛВ или в нашем случае оценка степени текущего состояния (износа) изоляции рассматриваемой КЛ; $x_1, x_2, x_3, x_4, \dots, x_n$ – входные переменные.

Все неблагоприятные для изоляции факторы соответствуют свойствам СНЛВ, которые используются нечеткой моделью. Они выражаются качественным способом, например: «уровень квалификации персонала, производящего эксплуатацию рассматриваемого кабеля». Каждый рассматриваемый фактор снижения электрической прочности диэлектрических материалов изоляции выражается своей лингвистической переменной. Такие переменные представляют собой по существу терм-множества $T_i = \{T_{1i}, T_{2i}, \dots, T_{mi}\}$. Эти термы представляются нечеткими оценками возможных проявлений входных переменных, например, «ниже среднего», «средний», «выше среднего».

Обработка исходной информации выполняется известными действиями: вычисление степеней принадлежности исходных переменных входным нечетким множествам; нахождение результирующей функции принадлежности выходной величины этой модели; получение четкого численного значения выходной величины на основе полученной ранее результирующей функции принадлежности [6, 12].

Такая СНЛВ отображает влияние входных переменных этой системы X_1, \dots, X_N на ее выходное значение Q :

$$X = (X_1, \dots, X_N) \rightarrow Q[0,100]. \quad (3)$$

На основе получаемого выходного значения формируются оценки, отражающие текущее состояние изоляции контролируемого кабеля:

- от 0 до 20 – значение оценки текущего состояния или уровня изоляции «очень низкая», необходимо незамедлительно выводить линию в КЛ для предотвращения возникновения аварии и перерыва в электропитании;
- от 20 до 40 – оценка уровня состояния изоляции «низкая»;
- от 40 до 60 – оценка уровня состояния изоляции «средняя»;
- от 60 до 80 – оценка уровня состояния изоляции «выше среднего»;
- от 80 до 100 – оценка уровня состояния изоляции «высокая».

Эта СНЛВ использует в своей работе значения тринадцати входных переменных, соответствующих учитываемым факторам [12]. Их влияние уместно представить для наглядности иерархическим деревом логического вывода [10] или графом. В таких графах выходное итоговое значение баз знаний нижнего уровня является входной для базы знаний верхнего уровня [13] – рис. 1. Свертки F_Y отображают рассмотренные выше категории факторов, негативно воздействующих на уровень изоляции. Можно также

представить каждую такую свертку F_Y как подсистему нечеткого вывода более низкого уровня, чем вся система в целом.

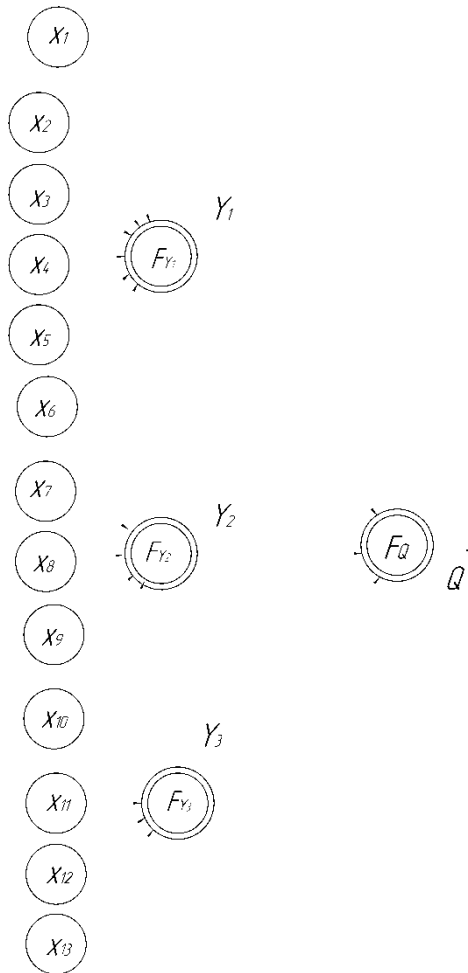


Рис. 1. Дерево нечеткого вывода

В подобных СНЛВ обычно не производится дефаззификация промежуточных нечетких значений (получение численных величин). Предлагается модернизировать рассмотренную систему НЛВ таким образом, чтобы производить дефаззификацию промежуточных нечетких значений на-

ряду с дефазификацией выходной нечеткой переменной. Это позволит определять вклад каждой из групп входных переменных (факторов) в текущее состояние изоляции рассматриваемой КЛ в случае получения низких числовых значений выходного параметра Q . На основе изучения числовых значений выходного параметра Q и сверток F_Y (промежуточных нечетких переменных) повышается обоснованность принимаемых решений по состоянию изоляции КЛ, поскольку при таком построении СНЛВ наглядно видны причины снижения качества изоляции.

В. Заключение

Представленная модернизация системы НЛВ дает возможность, наряду с численным значением выходного параметра (переменной), определять численные промежуточные оценки вклада групп факторов в итоговый результат. Это позволяет получать более обоснованные оценки негативных действий факторов, снижающих качество или состояние изоляции. В результате персонал электросетей может принимать необходимые меры по поддержанию нормального состояния изоляции КЛ.

© Бирюлин В.И., 2020

© Куделина Д.В., 2020

Библиографический список

- [1] Юрченко Е.Ю. Оценка состояния изоляции городских кабельных линий напряжением 6–10 кВ с разработкой рекомендаций по улучшению условий электробезопасности: дис. канд. техн. наук, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, 2009. – 147 с.
- [2] Коржов А.В. Оценка теплового режима работы изоляции в 2D-модели звена «кабель 6(10) кВ – грунт» в ANSYS с учетом подвижек грунта и уставок устройств релейной защиты // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2013. Т. 13. № 1. С. 39-45.
- [3] Коржов А.В. Метод оценки значимости влияния проектных и эксплуатационных факторов на срок службы изоляции силовых кабелей 6(10) кВ городских электрических сетей // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2014. Т. 14. № 1. С. 31-34.
- [4] Коржов А.В., Томашева Е.В. Причины старения бумажно-масляной изоляции силовых кабелей // Электробезопасность. 2006. № 1. С. 12-17.
- [5] Алиев Р.А., Церковный А.Э., Мамедова Г.А. Управление производством при нечеткой исходной информации. М.: Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
- [6] Пегат А. Нечеткое моделирование и управление. М.: Лаборатория знаний, 2013. – 798 с.
- [7] Капустин В.Ф. Неопределенность: виды, интерпретации, учет при моделировании и принятии решений // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 5: Экономика. 1993. Вып. 2 (№ 12). С. 108-114.

- [8] Беляев Л.С. Решение сложных оптимизационных задач в условиях неопределенности. Новосибирск: Наука, Сиб. отделение, 1978. – 128 с.
- [9] Беллман Р., Заде Л. Принятие решений в расплывчатых условиях / Вопросы анализа и процедуры принятия решений. М.: Мир, 1976. С. 172-215.
- [10] Штовба С.Д. Проектирование нечетких систем средствами MATLAB. М.: Горячая линия–Телеком, 2007. – 228 с.
- [11] Вагин В.Н., Поспелова Д.А. Достоверный и правдоподобный вывод в интеллектуальных системах. М.: Физматлитгиз, 2004. – 704 с.
- [12] Куделина Д.В. Нечеткая система контроля состояния изоляции // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Экономика Информатика. 2017. № 2 (251). Вып. 41. С. 102-107.
- [13] Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия–Телеком, 2004. – 452 с.

V.I. Biryulin, D.V. Kudelina

MODERNIZATION OF FUZZY INFERENCE SYSTEM FOR EVALUATING CURRENT STATE OF CABLE LINES INSULATION

Southwest State University
Kursk, Russia

Abstract. The article considers the assessments of the cable lines insulation state for various electrical networks. It is proposed to use a modernized fuzzy inference system to obtain an assessment of the insulation state. This system provides numerical values of both the output parameter and intermediate fuzzy variables, that allows more reasonable results to be obtained compared to using only the values of the output parameter.

Keywords: cable lines, expert estimates, fuzzy conclusion, fuzzy logic, insulation.

References

- [1] E.Yu. Yurchenko, «*Ocenka sostoyaniya izolyacii gorodskih kabel'nyh linij napryazheniem 6–10 kV s razrabotkoj rekomendacij po uluchsheniyu uslovij elektrobezopasnosti [Assessment of the insulation status of urban cable lines with a voltage of 6–10 kV with the development of recommendations for improving the electrical safety conditions]*», Cand. of Tech. S. thesis, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia, 2009 (in Russian).
- [2] A.V. Korzhov, «Estimation of thermal conditions of insulation in the ANSYS 2D model of link «cable line 6(10) kV – soil» with consideration for movements of soil and relay protection set values», *Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering»*, vol. 13, no. 1, pp. 39-45, Jan. 2013.

-
- [3] A.V. Korzhov, «Assessment method applied to the significance of design and operational factor influence on the service life of 6 (10) kV power cable insulation in urban networks», *Bulletin of the South Ural State University. Series «Power Engineering»*, vol. 14, no. 1, pp. 31-34, Jan. 2014.
- [4] A.V. Korzhov and E.V. Tomasheva, «Prichiny stareniya bumazhno-maslyanoy izolyacii silovyh kabelej [Reasons for aging paper-oil insulation of power cables]», *Electrical Safety*, no. 1, pp. 12-17, Jan. 2006 (in Russian).
- [5] R.A. Aliev, A.E. Tserkovnyy and G.A. Mamedova, *Upravlenie proizvodstvom pri nechetkoj iskhodnoj informacii [Production management with fuzzy source information]*. Moscow: Energoatomizdat, 1991 (in Russian).
- [6] A. Piegat, *Fuzzy modeling and control*. Physica-Verlag Heidelberg, 2001.
- [7] V.F. Kapustin, «Neopredelennost': vidy, interpretacii, uchet pri modelirovanii i prinyatii reshenij [Uncertainty: types, interpretations, accounting in modeling and decision making]», *St Petersburg University Journal of Economic Studies*, no. 2, pp. 108-114, 1993 (in Russian).
- [8] L.S. Belyaev, *Reshenie slozhnyh optimizacionnyh zadach v usloviyah neopredelennosti [The solution of complex optimization problems in the face of uncertainty]*. Novosibirsk: Science, Siberian Branch, 1978 (in Russian).
- [9] R.E. Bellman and L.A. Zadeh, «Decision-making in a fuzzy environment», *Management Science*, vol. 17, pp. 141-164, 1970.
- [10] S.D. Shtovba, *Proektirovanie nechetkih sistem sredstvami MATLAB [Designing fuzzy systems using MATLAB]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2007 (in Russian).
- [11] V.N. Vagin and D.A. Pospelova, *Dostovernyj i pravdopodobnyj vyvod v intellektual'nyh sistemah [Reliable and plausible conclusion in intelligent systems]*. Moscow: Fizmatlitgiz, 2004 (in Russian).
- [12] D.V. Kudelina, «Fuzzy control system of the insulation state», *Belgorod State University Scientific Bulletin. Economics. Information Technologies*, vol. 41, no. 2, pp. 102-107, March 2017 (in Russian).
- [13] D. Rutkovskaya, M. Pilinsky and L. Rutkovsky, *Nejronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy [Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems]*. Moscow: Goryachaya liniya – Telekom, 2004 (in Russian).