

Интернет-журнал «Наукovedение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-2>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN215.pdf>

DOI: 10.15862/45TVN215 (<http://dx.doi.org/10.15862/45TVN215>)

УДК 621.3.05

Каминский Александр Владимирович
ФГБОУ ВПО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Россия, Москва¹
Старший преподаватель
E-mail: sfmei_ees@mail.ru

Применение методов теории подобия для анализа работы трансформаторных подстанций

¹ Россия, 214013, г. Смоленск, Энергетический проезд, дом 1, кафедра Электроэнергетических.

Аннотация. Применение методов теории подобия и моделирования для исследования электрических систем позволяет решать новые задачи анализа и оценки эксплуатационных показателей. Проводить подробное исследование каждого объекта системы затруднительно, а результаты исследования, полученные для отдельных объектов, не всегда возможно уверенно распространить на подобные по типу и назначению. Методы теории подобия позволят получить более точную оценку технического состояния и уменьшить затраты на дополнительные обследования.

Одним из элементов электроэнергетической системы является трансформаторная подстанция. Оценка остаточного ресурса и некоторых других технических параметров трансформатора сложную и трудоемкую задачу.

Состав потребителей, наличие значительных ступенчатых нагрузок, частота их включений и отключений в большой степени определяют показатели надежности и прочие рабочие параметры силовых трансформаторов. Исходя из вышесказанного, подобие объектов электроэнергетической системы следует представлять в виде некоторой комплексной функции, содержащей набор наиболее значимых критериев подобия. Некоторые критерии определяются на основании анализа графиков нагрузок за наиболее характерные периоды времени. Изменяя интервалы наблюдений по часам суток, можно получить дополнительную информацию о подобии исследуемых объектов. Полученная информация носит вероятностный характер и рассматривается с позиций стохастического подобия.

Объединение информации о работе подобных объектов позволяет повысить точность оценки технического состояния трансформаторов в системах электроснабжения.

Ключевые слова: теория подобия; трансформаторная подстанция; критерии; график нагрузки; электроэнергетическая система.

Ссылка для цитирования этой статьи:

Каминский А.В. Применение методов теории подобия для анализа работы трансформаторных подстанций // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №2 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/45TVN215.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/45TVN215

Электрическая система представляет собой сложную техническую структуру, осуществляющую передачу, преобразование, распределение электроэнергии и состоящую из многих объектов. Оценка надежности ее работы – одна из важнейших задач и требует тщательного контроля и анализа технического состоянием всех компонентов системы. Проводить подробное исследование каждого объекта системы затруднительно, а результаты исследования, полученные для отдельных объектов, не всегда возможно уверенно распространить на подобные по типу и назначению. Методы теории подобия и моделирования позволяют расширить возможность применения результатов исследований к объектам, являющимся функциональными аналогами.

Характерным элементом электроэнергетической системы является трансформаторная подстанция. Одной из важнейших задач исследования данных объектов остается оценка остаточного ресурса и некоторых других технических параметров трансформатора. С определенной точки зрения все мощные трансформаторы энергосистем являются физическими аналогами, так как имеют сходную конструкцию, идентичные физические принципы работы, вид изоляции и прочее сходство. [1,2]. И в то же время условия их работы носят строго индивидуальный характер. График работы каждого такого объекта в силу объективных причин является уникальным, характер и скорости изменения температуры изоляции в разных точках трансформатора всегда будут иметь отличия. Все эти особенности функционирования объекта дают возможность только приближенного переноса информации с одного объекта на другой. Чаще всего в этих случаях речь идет о «средних» показателях и характеристиках. Подробное исследование каждой отдельной трансформаторной подстанции по многим показателям это достаточно трудоемкое и затратное мероприятие. Такие подробные исследования проводятся выборочно, для наиболее ответственных элементов электрической системы. Просто переносить полученные оценки на любую трансформаторную подстанцию без учета особенностей работы некорректно. И в то же время всегда есть необходимость иметь достаточно точные и глубокие рекомендации по оценке технических и технологических параметров работы основного оборудования и определять наиболее важные мероприятия по повышению его работоспособности. Уточнить и расширить имеющуюся информацию и рекомендации возможно, если применить методы теории подобия и моделирования.

Одним из направлений изучения подобия объектов может являться изучение графиков нагрузок трансформаторов. Анализ работы трансформаторов возможно проводить как по суточным графикам нагрузки так и по годовым за характерный период времени. Графики нагрузки по своей сути являются реализацией случайных процессов, поэтому для их анализа и сравнении наиболее подходят критерии стохастического подобия [3,4]. Это относится к пятому, дополнительному положению о подобии вероятностных объектов, когда критерии подобия образуются из числовых характеристик переменных случайных процессов. Например, случайные явления описываются двухпараметрическими распределениями одного вида и критерии подобия образуются отношением математического ожидания m к среднеквадратическому отклонению σ случайных параметров исследуемых явлений:

$$\pi = m / \sigma = idem. \quad (1)$$

В нашем случае удобно в качестве примера рассмотреть суточный график нагрузки, приведенный на рис.1.

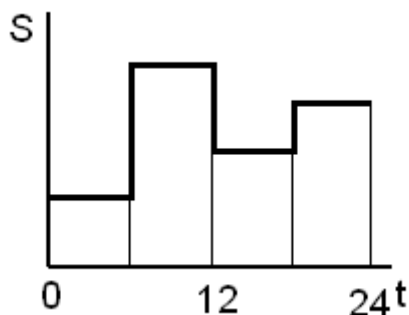


Рис. 1. Суточный график нагрузки трансформаторной подстанции

Для анализа возьмем величину загрузки трансформатора в часы дневного и вечернего максимумов. Результатом проведенных наблюдений будет статистический ряд, который можно обрабатывать методами математической статистики. Наиболее удобно продолжить оценку технических характеристик в относительных единицах, приняв за базисные значения номинальную мощность трансформаторов. Одним из таких характерных параметров, определяющих многие показатели в работе служит коэффициент загрузки $kз$, получаемый как отношение пропускаемой мощности S в конкретный момент времени к номинальной мощности трансформатора.

$$kз = S / S_{ном.}$$

Данный показатель вполне может быть использован в качестве критерия подобия для оценки и обобщения информации о работе трансформаторов различных трансформаторных подстанций систем электроснабжения.

Для получения достоверных оценок необходимо выполнить достаточно большой объем наблюдений, для каждого из которых зафиксировать параметры суточного графика. Выполнив обработку статистических данных по наблюдаемому объектам за характерный период времени, можно получить для каждого из них значения математического ожидания m_{ki} коэффициента загрузки $kз$ трансформатора и его среднеквадратическое отклонение σ_{ki} как для дневного так и для вечернего максимумов. Само отношение значений дневного и вечернего максимумов также рассматриваться в качестве важного критерия оценки подобия объектов.

По полученным значениям статистического ряда строится зависимость плотности распределения случайной величины:

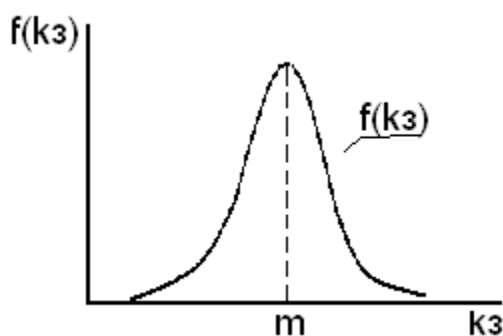


Рис. 2. Плотность распределения оценок загрузки трансформатора

Критерии подобия будут образованы отношением:

$$\pi_i = m_{ki} / \sigma_{ki} \quad (2).$$

Совершенно справедливо отметить, что суточные графики нагрузок трансформаторов, приведенные на рис.1 носят достаточно условный характер и могут применяться только на

начальном этапе исследования подобия объектов. Следует отметить, что само соотношение дневного и вечернего максимумов также является важным показателем, характеризующим технологические особенности работы крупной трансформаторной подстанции электроэнергетической системы. Исходя из вышесказанного, подобие объектов электроэнергетической системы следует представлять в виде некоторой комплексной функции, содержащей набор наиболее значимых критериев подобия вида:

$$Y(\pi) = f(\pi_{k1}, \pi_{k2}, \pi_{k3} \dots \pi_{ki} \dots \pi_{kn})$$

где $Y(\pi)$ – комплексная функция подобия объектов, π_{ki} – критерий подобия по i -ому параметру оценки подобия исследуемых объектов электроэнергетической системы.

Критерии подобия, полученные в результате обработки случайных величин, также носят вероятностные признаки и полного совпадения оценок быть не может. В этом случае следует рассматривать их с точки зрения вероятности подобия. При полном совпадении критериев подобия фигуры плотности распределения (Рис.3) для объектов сравнения имеют полное совпадение и общая площадь имеет максимальную величину. При неполном (вероятностном) подобии вероятность подобия определяется как отношение общей, совпадающей площади фигур к площади одной из них.

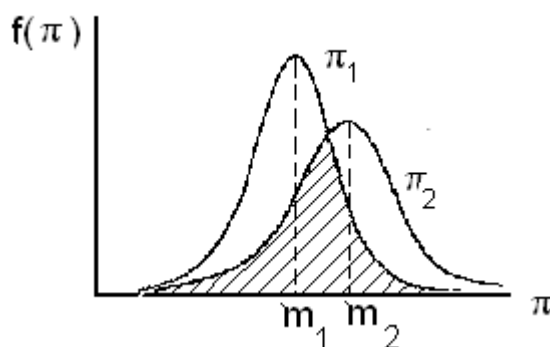


Рис. 3. Плотности распределения оценок подобия π_1 и π_2 сравниваемых объектов

Еще одним важным фактором, влияющим на подобие при оценке работы оборудования трансформаторных подстанций, является состав наиболее мощных потребителей. Вариации состава нагрузки оказывает значительное влияние на все оценки эксплуатационных показателей [5]. Наличие значительных ступенчатых нагрузок, частота их включений и отключений в большой степени определяют показатели надежности и прочие рабочие параметры силовых трансформаторов [6,7]. В этой связи желательно ввести различие по составу нагрузок и возможности появления кратковременных перегрузок оборудования. В этой связи важным техническим параметром, характеризующим особенности работы трансформаторов в электроэнергетической системы, является значение высокого, среднего и низкого напряжений. Трансформаторные подстанции с высоким напряжением 220 кВ. и выше имеют достаточно стабильные нагрузки в характерные часы суток. Для этих трансформаторных подстанций имеет место определенное «сглаживание» графиков нагрузки за счет большого числа всех потребителей обслуживаемого района. Другой особенностью таких подстанций является повышенные требования по показателям надежности, что вызывает необходимость тщательного анализа режима работы и контроля за техническим состоянием основного оборудования. Оценка эксплуатационных показателей и прогноз технического состояния методами теории подобия с использованием данных о подобных объектах становится актуальным. Трансформаторные подстанции с высоким напряжением 110 кВ. более подвержены переменному графику нагрузок, могут иметь место «пиковые» перегрузки в различные часы суток [7,8]. Для таких трансформаторов график нагрузки,

приведенный на рис.1, является упрощенным и его необходимо заменить другим, более соответствующим реальному режиму с выделением реальных характерных интервалов времени по часам суток [9,10]. Соответственно может измениться и количество рассматриваемых интервалов. График изменения нагрузки, приведенный на рис.1 охватывает слишком большой интервал времени и имеет «осредненный» характер. Реально за этот же интервал времени может характеризоваться значительными изменениями от S_{max} до S_{min} и, соответственно, разными температурами нагрева проводников обмоток трансформатора. Соответственно и износ изоляции для этих отдельных интервалов также будет меняться. Если ширина интервала наблюдения по суточному графику рис.1 составляет 6 часов, то время фиксации отдельного состояния нагрузки трансформатора на интервале от t_1 до t_2 определяется постоянной времени нагрева проводников обмотки трансформатора τ и должен быть не менее τ .

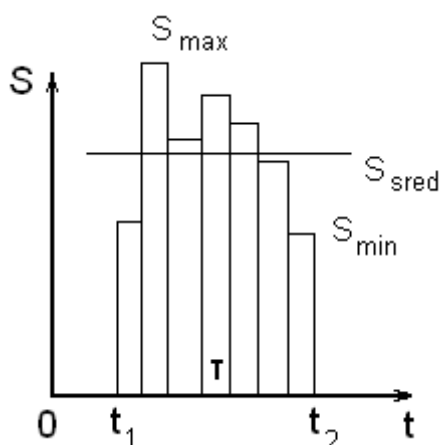


Рис. 4. Ступенчатый график нагрузки трансформатора

Общий износ изоляции будет определяться выделением тепла в проводниках обмоток и значением достигнутых при этом температур на заданном суточном интервале наблюдений. В результате решения уравнения теплового баланса можно получить значение температуры нагрева проводников обмоток θ в зависимости от тока нагрузки I для определенного интервала времени [6]:

$$\theta = \theta_{ном} \left(\frac{I}{I_{ном}} \right)^2 (I - e^{-rt}) + \theta_0 e^{-rt} \quad (3),$$

где r – величина, обратная постоянной времени нагрева; $\theta_{ном}$ – температура нагрева, соответствующая нормальной нагрузке; θ_0 – начальная температура; I – ток нагрузки в рассматриваемый период времени; $I_{ном}$ – номинальный ток.

Методы теории подобия позволят получить более точную оценку технического состояния и уменьшить затраты на дополнительные обследования.

Для анализа возможности объединения информации о работе трансформаторов при ступенчатом графике нагрузок (Рис.4) можно использовать в качестве критерия подобия относительное превышение нагрузки трансформатора по отношению к номинальному или некоторому заданному значению [10,11,12] по интервалам суточного графика

$$\pi_m = |S_{max} - S_{ном}| / S_{ном} \quad (4).$$

Дополнительно к критерию (4) целесообразно ввести оценку относительной длительности импульса максимума нагрузки на заданном интервале:

$$\pi_t = \tau_{max} / (t_2 - t_1),$$

где τ_{max} – длительность максимальной нагрузки трансформатора на заданном интервале наблюдений $t_1 - t_2$.

Анализируя длительности импульсов пиковых нагрузок разной величины, можно получить обобщенную характеристику подобия графиков нагрузок трансформаторов, работающих в системах электроснабжения.

Объединяя при помощи методов теории подобия информацию о работе трансформаторов на распределительных подстанциях систем электроснабжения, становится возможным уточнить графики планово-предупредительного обслуживания и ремонта, более достоверно прогнозировать возможность появления отказов и отключений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. - М.: Высш. школа, 1976 -480 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические поля и процессы электрических машинах и их физическое моделирование. – М.: Энергия, 1969.-304с.
3. Гордиевский И.Г., Кавченков В.П., Основы моделирования систем электроснабжения. М.: МЭИ, - 1983. 88 с.
4. Мирский Г.Я. Характеристики стохастической взаимосвязи их измерения. М.: Энергоатомиздат,1982. 320 с.
5. Гуревич Ю.Е, Либова Л.Е., Хачатрян Э.А. Устойчивость нагрузки электрических систем. М.: Энергоиздат, 1981. – 208 с.
6. Фокин Ю.А., Туфанов В.А. Оценка надежности систем электроснабжения. - М., Энергоиздат, 1981-224 с.
7. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л., Степанов В.П. Методы вероятностного моделироваая в расчетах характеристик электрических нагрузок потребителей. – М.: Энергоатомиздат, 1990.-128 с.
8. Фокин Ю.А. Вероятностно-статистические методы в расчетах систем электроснабжения. М.: Энергоатомиздат, 1985. 240с.
9. Справочник по энергоснабжению и электрооборудованию промышленных предприятий и общественных зданий /под общ.ред. профессоров МЭИ(ТУ) С.И Гамазина, Б.И. Кудрина, С.А. Цыркуа, - М.: Издательский дом МЭИ, 2010.- 745 с.
10. Федоров А.А., Каменев В.В. Основы электроснабжения промышленных предприятий: М.: Энергоатомиздат, 1984.-472 с.
11. Гордиевский И.Г., Каминский А.В. Подобие и моделирование кабельных линий 6-10 кВ. Сборник трудов №8, МЭИ (ТУ)Смоленский филиал, 1995. - 264 с.
12. Кавченков В.П., Солопов Р.В. Алгоритм комплексной оптимизации режимов электроэнергетической системы с использованием обобщенных критериев подобия. Международный журнал «Программные продукты и системы». – №1, 2013.

Рецензент: Почечуев Сергей Викторович, к.т.н, начальник службы энергетических режимов и балансов ОАО «СО ЕЭС» «Региональное диспетчерское управление энергосистемами Брянской, Калужской и Смоленской областей».

Kaminskiy Aleksander Vladimirovich

The Branch of National Research University "Moscow Power Engineering Institute" in Smolensk
Russia, Smolensk
E-mail: sfmei_ees@mail.ru

The application of the methods of similarity theory for the analysis of transformer substations

Abstract. The application of the methods of similarity theory and modeling for the research of electrical systems allows to solve new problems of analysis and evaluation of performance. A detailed research of each object in the system is difficult, and the results of studies obtained for individual objects can not always be confidently extended to similar type and purpose. Methods of similarity theory provide a more accurate assessment of the technical condition and reduce the costs of additional examinations.

One of the elements of the power system is a transformer substation. The assessment of residual life and other technical parameters of the transformer is a complex and time-consuming task.

The composition of the consumer, the presence of significant step loads, the frequency of their on and off in the patient determine the degree of reliability and other performance parameters of power transformers. The similarity of objects of power system should be presented in the form of a complex function, comprising a set of the most significant similarity criteria. Some criteria are based on the analysis of graphs loads for the most characteristic periods of time. You can get more information about the similarity of the objects by varying intervals of observations by the hour of the day. The resulting information is probabilistic in nature and considered stochastic similarity.

Combining information on these objects can improve the accuracy of estimation of technical condition of transformers in power systems.

Keywords: similarity theory; transformer substation; criteria; load curve; electric power system.

REFERENCES

1. Venikov V.A. Teoriya podobiya i modelirovaniya. - M.: Vyssh. shkola, 1976 -480 s.
2. Ivanov-Smolenskiy A.V. Elektricheskie polya i protsessy elektricheskikh mashinakh i ikh fizicheskoe modelirovanie. – M.: Energiya, 1969.-304s.
3. Gordievskiy I.G., Kavchenkov V.P., Osnovy modelirovaniya sistem elektrosnabzheniya. M.: MEI, - 1983. 88 s.
4. Mirskiy G.Ya. Kharakteristiki stokhasticheskoy vzaimosvyazi ikh izmereniya. M.: Energoatomizdat,1982. 320 s.
5. Gurevich Yu.E, Libova L.E., Khachatryan E.A. Ustoychivost' nagruzki elektricheskikh sistem. M.: Energoizdat, 1981. – 208 s.
6. Fokin Yu.A., Tufanov V.A. Otsenka nadezhnosti sistem elektrosnabzheniya. - M., Energoizdat, 1981-224 s.
7. Zhezhelenko I.V., Saenko Yu.L., Stepanov V.P. Metody veroyatnostnogo modelirovaniya v raschetakh kharakteristik elektricheskikh nagruzok potrebiteley. – M.: Energoatomizdat, 1990.-128 s.
8. Fokin Yu.A. Veroyatnostno-statisticheskie metody v raschetakh sistem elektrosnabzheniya. M.: Energoatomizdat, 1985. 240s.
9. Spravochnik po energosnabzheniyu i elektrooborudovaniyu promyshlennykh predpriyatiy i obshchestvennykh zdaniy /pod obshch.red. professorov MEI(TU) S.I Gamazina, B.I. Kudrina, S.A. Tsyrkua, - M.: Izdatel'skiy dom MEI, 2010.- 745 s.
10. Fedorov A.A., Kamenev V.V. Osnovy elektrosnabzheniya promyshlennykh predpriyatiy: M.: Energoatomizdat, 1984.-472 s.
11. Gordievskiy I.G., Kaminskiy A.V. Podobie i modelirovanie kabel'nykh liniy 6-10 kV. Sbornik trudov №8, MEI (TU)Smolenskiy filial, 1995. - 264 s.
12. Kavchenkov V.P., Solopov R.V. Algoritm kompleksnoy optimizatsii rezhimov elektroenergeticheskoy sistemy s ispol'zovaniem obobshchennykh kriteriev podobiya. Mezhdunarodnyy zhurnal «Programmnye produkty i sistemy». – №1, 2013.