

ПРИВЕДЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПЛЕКСНОЙ НАГРУЗКИ К УЗЛУ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПО ДАННЫМ ИЗМЕРЕНИЙ В УДАЛЕННЫХ УЗЛАХ

М.А. Дзюба, dziubama@susu.ru

В.И. Сафонов, safonovvi@susu.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. В статье рассматривается методика пересчета коэффициентов статических характеристик комплексной нагрузки в узлах электрических сетей 35–220 кВ по полученным экспериментальным данным для некоторых узлов сети. Необходимость пересчета статических характеристик нагрузки для близлежащих частей сети возникает из-за проблем с доступом к точкам сетей, принадлежащим частным компаниям, ограничения по количеству сертифицированного измерительного оборудования при проведении активного эксперимента, а также из-за отсутствия технической возможности подключения измерительного оборудования в некоторых местах электрической сети. Для пересчета формируется модель участка электрической сети, в которой используются стандартные модели таких элементов сети, как трансформаторы, токоограничивающие реакторы и линии электропередачи. Эти модели в дальнейшем разделяются на элементарные четырехполюсники (многополюсники), и расчет выполняется последовательно для каждого из них. Приведенная методика является общей и позволяет провести расчет статических характеристик нагрузки в произвольной точке электрической сети по экспериментальным данным в некоторых точках сети.

Ключевые слова: системообразующие и распределительные сети, статические характеристики комплексной нагрузки, силовые трансформаторы, многополюсники

Для цитирования: Дзюба М.А., Сафонов В.И. Приведение статических характеристик комплексной нагрузки к узлу электрической сети по данным измерений в удаленных узлах // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 3. С. 27–31. DOI: 10.14529/power220303

Original article
DOI: 10.14529/power220303

CALCULATION OF ZIP LOAD MODEL COEFFICIENTS IN THE NEARBY PARTS OF THE ELECTRICAL NETWORK USING MEASUREMENT DATA

M.A. Dziuba, dziubama@susu.ru

V.I. Safonov, safonovvi@susu.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. The article discusses the methodology for recalculating the coefficients of ZIP load model in nodes of electric networks 35–220 kV, according to the experimental data obtained for some another network nodes. The need to recalculate the static load characteristics for nearby parts of the network arises due to problems between networks owners and the insufficient number of certified measuring equipment during the active experiment, as well as the impossibility of connecting the measuring equipment in some places of the electrical network. For recalculation, a model of an electrical network section is formed and standard models of network elements such as transformers, current-limiting reactors and power lines are used. These models are divided into elementary multipoles and the calculation is performed sequentially for each of them. The given technique is general and allows recalculating the ZIP model coefficients of the load at an arbitrary point of the electrical network according to experimental data at some points of the network.

Keywords: backbone and distribution networks, ZIP model of load, power transformers, multipoles

For citation: Dziuba M.A., Safonov V.I. Calculation of ZIP load model coefficients in the nearby parts of the electrical network using measurement data. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering.* 2022;22(3):27–31. (In Russ.) DOI: 10.14529/power220303

Введение

Знание статических характеристик нагрузки (СХН) важно для решения многих задач проектирования и управления в системообразующих и распределительных сетях. В сетях 35–220 кВ правильное моделирование нагрузки и точное определение коэффициентов моделей позволяет решать не только технические задачи, такие как поддержание устойчивости сетей [1, 2], но и технико-экономические задачи по организации оптимальных перетоков мощности [3, 4]. В распределительных сетях СХН важны для определения оптимальных условий компенсации реактивной мощности [5] и управления сетями [6].

Определение коэффициентов СХН обсуждается в работах, выполненных как на основе симуляционных моделей сетей [7], так и реальных экспериментальных данных [8, 9].

Как показал опыт экспериментального определения коэффициентов СХН в РФ [10–13], наиболее точным и эффективным, но не всегда возможным является проведение активного эксперимента, суть которого заключается в принудительном изменении напряжения потребителя и регистрации изменения его активной и реактивной мощности. На практике реализация данного подхода встречает массу затруднений. Поскольку эксперимент проводится на действующем энергообъекте, достижимый диапазон изменения напряжения ограничивается допустимыми предельными значениями для сохранения нормальной работы данного потребителя или группы потребителей. Режим работы и состав электроприемников потребителей может измениться в течение эксперимента. Для некоторых типов нагрузок (электрометаллургия, горнодобывающая промышленность и др.) это изменение может составлять сотни процентов [14].

Постановка задачи

Таким образом, измерение СХН является достаточно сложной задачей. При проведении экспериментов, как правило, используется ограниченное количество измерительных приборов необходимого класса точности. Кроме того, могут возникать сложности с доступом, если объект находится в собственности другой организации.

Наиболее часто возникает необходимость в расчете СХН на высоком напряжении трансформатора по измеренной характеристике (характеристикам) на низком напряжении двухобмоточного трансформатора (трехобмоточного трансформатора или трансформатора с расщепленными обмотками). Практический опыт авторов по измерению СХН по заказам организаций показывает, что не всегда есть возможность подключения сертифицированного измерительного оборудования одновременно на стороне высокого и низшего напряжения подстанции. Это может быть связано как с доступом к измерительным цепям первичных датчиков, так и наличием требуемого количества измерительного оборудования. Однако Заказчику требуется получить СХН как на низком, так и на высоком напряжении трансформатора, и, следовательно, оборудования для проведения измерений за один допустимый активный эксперимент просто недостаточно. Для проведения исследований понадобится повторение эксперимента, что, как правило, не приветствуется и собственниками подстанции, и потребителями, подключенными к ней.

Поэтому возникает необходимость получения СХН расчетным путем для точек (узлов) систем электроснабжения, ближайших к тем, в которых проведены измерения. Методика пересчета должна быть общей, поскольку в реальных сетях промышленных предприятий возникают весьма экзотические варианты соединения трансформаторов и токоограничивающих реакторов. Далее рассмотрена методика пересчета СХН, отвечающая указанным требованиям.

Методика расчета

Разделим произвольный элемент СЭС на элементарные многополюсники, соответствующие узлу сети и ветви сети. Произвольную ветвь схемы можно смоделировать при помощи двух четырехполюсников, показанных на рис. 1.

Пусть для четырехполюсника (рис. 1а) известны величина напряжения U_2 , тока $I_1 = I_2$, активной P_2 и реактивной Q_2 мощности нагрузки. Также известно комплексное сопротивление $Z = R + jX$ четырехполюсника. Используя баланс активных и реактивных мощностей, а также выражения для треугольника мощностей для входа и выхода четырехполюсника, получим напряжение U_1 , активную P_1 и реактивную Q_1 мощности на входе четырехполюсника:

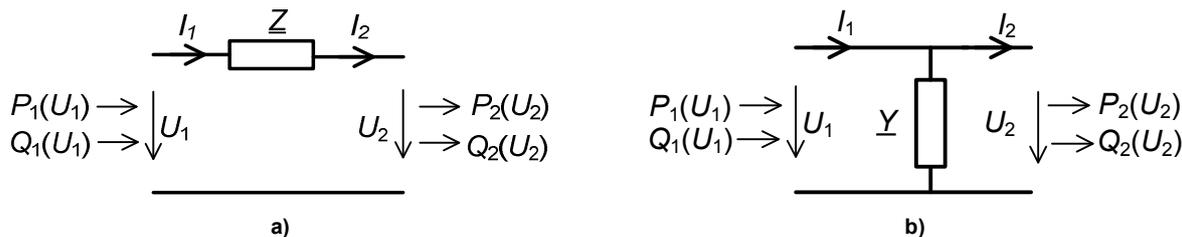


Рис. 1. Элементарные четырехполюсники
Fig. 1. Elementary four-poles

$$\begin{aligned}
 U_1 &= U_2 \sqrt{\frac{P_1^2 + Q_1^2}{P_2^2 + Q_2^2}}; \\
 P_1 &= P_2 + R \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}; \\
 Q_1 &= Q_2 + X \frac{P_2^2 + Q_2^2}{U_2^2}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Пусть для четырехполюсника (рис. 1б) известны: величина напряжения U_2 , активной P_2 и реактивной Q_2 мощности нагрузки. Также известна комплексная проводимость $\underline{Y} = G + jB$ четырехполюсника. Активная P_1 и реактивная Q_1 мощности, а также величина напряжения U_1 на входе четырехполюсника определяются в виде:

$$P_1 = P_2 + GU_2^2; \quad Q_1 = Q_2 + BU_2^2; \quad U_1 = U_2. \tag{2}$$

Полученные выражения (1) и (2) позволяют вычислить функции СХН для входа элементарного четырехполюсника $P_1(U_1)$ и $Q_1(U_1)$ по известным статическим характеристикам нагрузки для выхода четырехполюсника $P_2(U_2)$ и $Q_2(U_2)$. Таким образом, можно смоделировать линию электропередачи или двухобмоточный трансформатор, т. е. любую ветвь системы электроснабжения, в виде каскадного соединения элементарных четырехполюсников (см. рис. 1). Последовательно применяя формулы (1) или (2), можно получить СХН для его выхода. Пересчет характеристик можно осуществить и с входа на выход четырехполюсника, если провести несложные преобразования в выражениях (1) и (2).

Узел системы электроснабжения моделируется многополюсником. В случае соединения 3 ветвей модель представлена на рис. 2.

В качестве узла электрической сети может выступать секция шин или сдвоенный токоограничивающий реактор. В этом случае $U_1 = U_2 = U_3$ и пересчет характеристик определяется уравнениями баланса мощностей:

$$P_1 = P_2 + P_3; \quad Q_1 = Q_2 + Q_3. \tag{3}$$

При необходимости количество ветвей в узле может быть легко увеличено.

Также в качестве узла может рассматриваться идеальный трехобмоточный трансформатор или трансформатор с расщепленными обмотками. В этом случае уравнения (3) дополняются уравнениями идеального трансформатора

$$U_1 = K_{T2}U_2 = K_{T3}U_3. \tag{4}$$

Пример использования методики

В качестве примера приведем пересчет статических характеристик нагрузки с обмоток низкого и среднего напряжения трехобмоточного трансформатора на обмотку высокого напряжения.

Исходными данными являются измеренные СХН для низкого напряжения

$$P_2(U_2) = A_2 + B_2U_2 + C_2U_2^2; \tag{5}$$

$$Q_2(U_2) = a_2 + b_2U_2 + c_2U_2^2$$

и среднего напряжения

$$P_3(U_3) = A_3 + B_3U_3 + C_3U_3^2; \tag{6}$$

$$Q_3(U_3) = a_3 + b_3U_3 + c_3U_3^2,$$

где $A_2, B_2, C_2; A_3, B_3, C_3; a_2, b_2, c_2; a_3, b_3, c_3$ – постоянные коэффициенты СХН. Исходные характеристики для обмоток низкого (5) и среднего (6) напряжения должны быть представлены в именованных единицах (кВт, квар).

Схема замещения трансформатора изображена на рис. 3. Для получения элементов схемы замещения необходима стандартная информация о каталожных данных трехобмоточного трансформатора.

На схеме замещения (см. рис. 3) трансформатор представлен 3 четырехполюсниками, моделирующими обмотки высокого (1), низкого (2) и среднего (3) напряжения; четырехполюсником, моделирующим сердечник (4), и шестиполюсником (5), моделирующим идеальный трансформатор.

Проводя объемные, но несложные вычисления, получаем СХН на обмотке высокого напряжения:

$$P_1(U_1) = A_1 + B_1U_1 + C_1U_1^2; \tag{7}$$

$$Q_1(U_1) = a_1 + b_1U_1 + c_1U_1^2.$$

СХН (7) также получается в именованных единицах, но при необходимости ее можно пере-

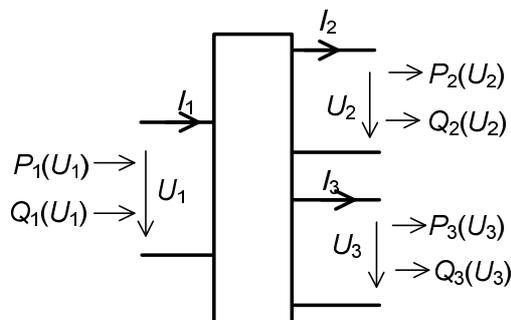


Рис. 2. Модель узла сети
Fig. 2. Network node model

заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. 2015. № 1 (182). С. 54–59. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-54-59

13. Skamyin A.N., Lyubin E.A. Papermaking plant static load characteristics experimental determination // *International journal of Applied Engineering Research*. 2016. Vol. 11, no. 9. P. 6328–6333.

14. Определение статических характеристик нагрузки по напряжению в электрических сетях с комплексной нагрузкой / С.В. Балдов, О.А. Бушуева, Д.Н. Кормилицын и др. // *Вестник ИГЭУ*. 2014. № 6. С. 22–30.

References

1. Winter A., Igel M., Schegner P. Application of artificial intelligence in power grid state analysis and diagnosis. In: *Proc. of NEIS 2020, Conference on Sustainable Energy Supply and Energy Storage Systems*. 2020. P. 1–6.

2. Chershova V.O. *Kontrol' ustoychivosti uzlov dvigatel'noy nagruzki elektricheskikh setey v rezhime real'nogo vremeni: dis. kand. tekhn. nauk* [Real-time monitoring the stability of the motor load nodes of electrical networks in real time. Cand. sci. diss.]. Novosibirsk, 2016. 133 p. (In Russ.)

3. Bazrafshan M., Gatsis N. Convergence of the Z-Bus Method for Three-Phase Distribution Load-Flow with ZIP Loads. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2017;33(1):153–165. DOI: 10.1109/TPWRS.2017.2703835

4. Nazir F.U., Pal B.C., Jabr R.A. Approximate Load Models for Conic OPF Solvers. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2021;36(1):549–552. DOI: 10.1109/TPWRS.2020.3029370

5. Hosseini-Hemati S., Sheisi G.H., Karimi S. Allocation-Based Optimal Reactive Power Dispatch Considering Polynomial Load Model Using Improved Grey Wolf Optimizer. *Iran J Sci Technol Trans Electr Eng*. 2021;(45):921–944. DOI: 10.1007/s40998-021-00419-8

6. Vargas L.S., Canizares C.A. Time dependence of controls to avoid voltage collapse. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2000;15(4):1367–1375. DOI: 10.1109/59.898114.0

7. Cui M., Wang J., Wang Y., Diao R., Shi D. Robust Time-Varying Synthesis Load Modeling in Distribution Networks Considering Voltage Disturbances. *IEEE Transactions on Power Systems*. 2019;34(6):4438–4450. DOI: 10.1109/TPWRS.2019.2918541

8. Skamyin A.N., Lyubin E.A. Papermaking plant static load characteristics experimental determination. *International journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(9):6328–6333.

9. Bokhari A., Alkan A., Doğan R. et al. Experimental Determination of the ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2014;29(3):1372–1381. DOI: 10.1109/TPWRD.2013.2285096

10. Pankratov A.V., Polishchuk V.I., Batseva N.L. Measurement-Based Approach for Identification of Static Load Models of Electric Power Systems. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2015;15(1):11–20. (In Russ.) DOI: 10.14529/power150102

11. Perminov S.I., Suvorov A.A., Tavlintsev A.S., Shorikova M.E. Load response forecasting for solving static load voltage models identification problem. In: *Elektroenergetika glazami molodezhi* [Power industry through the eyes of youth]. 2015. P. 259–264. (In Russ.)

12. Kravchenko V.F., Nagai V.I., Burakov I.F., Zolov B.P. Determination of the static characteristics of the load power of network nodes based on active experiment. *News of higher educational institutions. North Caucasian region. Series: Engineering sciences*. 2015;1(182):54–59. (In Russ.) DOI: 10.17213/0321-2653-2015-1-54-59

13. Skamyin A.N., Lyubin E.A. Papermaking plant static load characteristics experimental determination. *International journal of Applied Engineering Research*. 2016;11(9):6328–6333.

14. Baldov S.V., Bushueva O.A., Kormilitsyn D.N. et al. Determination of the static characteristics of the voltage load in electrical networks with a complex load. *“Vestnik IGEU” journal*. 2014;(6):22–30. (In Russ.)

Информация об авторах

Дзюба Михаил Александрович, канд. техн. наук, доц., кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dziubama@susu.ru.

Сафонов Валерий Иванович, канд. физ.-мат. наук, доц., кафедра электрических станций, сетей и систем электроснабжения, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; safonovvi@susu.ru.

Information about the authors

Mikhail A. Dzyuba, Cand. Sci. (Eng.), Ass. Prof., Department of Power Stations, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dziubama@susu.ru.

Valery I. Safonov, Cand. Sci. (Phys. and Math.), Ass. Prof., Department of Power Stations, Networks and Power Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; safonovvi@susu.ru.

Статья поступила в редакцию 12.07.2022; одобрена после рецензирования 30.07.2022; принята к публикации 30.07.2022.

The article was submitted 12.07.2022; approved after reviewing 30.07.2022; accepted for publication 30.07.2022.