

Идентификация параметров источника питания промышленной электрической сети

А.О. Кашканов

Волжский государственный университет водного транспорта

Аннотация: Предлагается способ идентификации значений параметров источника питания промышленной электрической сети методом множественной линейной регрессии, позволяющий определить его внешнюю характеристику на основании выборки текущих значений напряжения и тока в узле нагрузки. Такой подход позволяет в режиме реального времени формировать управляющий сигнал на устройства динамической компенсации искажений напряжения.

Ключевые слова: схема замещения, регулирование напряжения, множественная линейная регрессия.

Задача идентификации параметров источника питания (полного внутреннего сопротивления и напряжения холостого хода) промышленной электрической сети возникает при анализе влияния электроприемников с изменяющимся коэффициентом мощности на величину падения напряжения на полном внутреннем сопротивлении источника [1]. Внутреннее сопротивление источника определяется структурой и протяженностью электрической сети объекта; ниже будем считать его постоянным. Под напряжением холостого хода источника в данной статье понимается напряжение промышленной сети переменного тока, приведенное ко вторичной обмотке трансформатора питания объекта (далее — напряжение источника). Это напряжение может изменяться в определенных пределах согласно [2] и требует измерения в режиме реального времени. Вместе с тем, прямое измерение напряжения источника и сопротивления питающей линии возможно лишь при отключении нагрузки от источника, что потребует остановки производственного процесса.

Ниже предлагается способ, при котором полное внутреннее сопротивление и напряжение источника могут быть определены с помощью математической модели эквивалентного электроприемника с источником

питания [3] методом множественной линейной регрессии [4] на основании действующих значений тока и напряжения в узле нагрузки. Эти параметры определяют внешнюю характеристику источника, зная которую возможно в реальном времени определять амплитуду колебаний напряжения в узле нагрузки и формировать управляющий сигнал на устройства динамической компенсации искажений напряжения (ДКИН).

Рассмотрим эквивалентную схему замещения узла нагрузки (рис. 1),

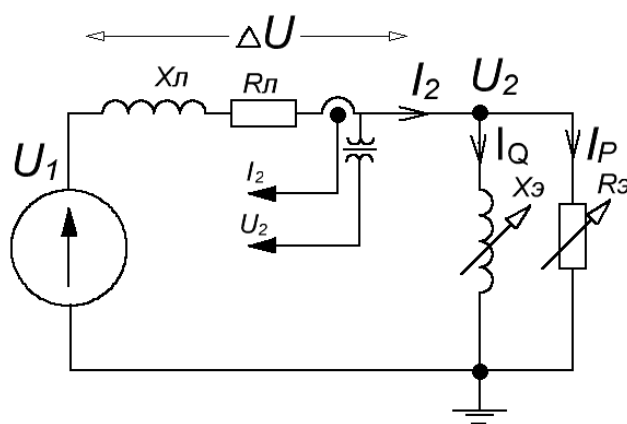


Рис. 1. Эквивалентная схема замещения узла нагрузки

где U_1 – напряжение источника питания; U_2 – напряжение в узле нагрузки; ΔU – падение напряжения на питающей линии; $R_{л}, X_{л}$ – соответственно эквивалентное активное и реактивное сопротивление питающей линии; I_2 – ток, потребляемый нагрузкой; $R_{э}, X_{э}$ – соответственно эквивалентное активное и реактивное сопротивление нагрузки.

Значения U_2 и I_2 измеряются с помощью установленных в ДКИН датчиков тока и напряжения.

Согласно рис. 1 напряжение в узле нагрузки определяется текущим значением напряжения источника питания, уменьшенным на величину падения напряжения на сопротивлении питающей линии

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta\dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{I} \cdot Z_{л},$$

где $Z_{л} = R_{л} + jX_{л}$ – полное сопротивление питающей линии.

Раскладывая падение напряжения $\Delta\dot{U}$ на активную $\Delta\dot{U}_p$ и реактивную $\Delta\dot{U}_Q$ составляющую, получим уравнение вида [5, 6]

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 - \Delta\dot{U}_p - \Delta\dot{U}_Q,$$

или в скалярной форме

$$U_2 = U_1 - \frac{P_2}{U_2} R_{л} - \frac{Q_2}{U_2} X_{л}. \quad (1)$$

Приняв

$$\frac{P_2}{U_2} = I_p, \quad \frac{Q_2}{U_2} = I_Q, \quad (2)$$

получаем соотношение

$$U_2 = U_1 - R_{л} I_p - X_{л} I_Q, \quad (3)$$

представляющее собой выражение множественной линейной регрессии

$$y = \Theta_0 + \Theta_1 x_1 + \Theta_2 x_2, \quad (4)$$

с двумя переменными x_1, x_2 ($x_1 = I_p$, $x_2 = I_Q$), в котором y соответствует U_2 ; коэффициентам регрессии $\Theta_0, \Theta_1, \Theta_2$ отвечают величины $U_1, -R_{л}, -X_{л}$. Эти коэффициенты изначально неизвестны и определяются с помощью обучающего набора данных. Для этого проводится некоторое количество K измерений напряжения в узле нагрузки U_2^i при различных активном и реактивном токах I_p^i, I_Q^i , потребляемых нагрузкой, где $i = \overline{1, K}$. Эти данные определяют значения

$$X = \begin{bmatrix} 1 & I_p^1 & I_Q^1 \\ 1 & I_p^2 & I_Q^2 \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & I_p^K & I_Q^K \end{bmatrix} - \text{матрицы потребляемых токов размерности } 3 \times K,$$

$$Y = \begin{bmatrix} U_2^1 \\ U_2^2 \\ \dots \\ U_2^K \end{bmatrix} - \text{матрицы напряжений в узле нагрузки размерности } 1 \times K,$$

зная которые можно с помощью матричного метода [7, 8] по формуле

$$\Theta = (X^T X)^{-1} X^T Y. \quad (5)$$

найти значения коэффициентов регрессии $\Theta = [\theta_0 \ \theta_1 \ \theta_2]$ размерности 3×1 .

Таким образом, в соответствии с (3)-(5) определяются значения напряжения источника U_1^θ и параметры схемы замещения питающей линии $R_{л}^\theta, X_{л}^\theta$.

На примере тестового набора данных произведем расчет величин $U_1^\theta, R_{л}^\theta, X_{л}^\theta$ для типовых значений $R_{л}, X_{л} = 0.05, 0.16, 0.28$ и 0.4 Ом. Общее количество возможных комбинаций $R_{л}, X_{л}$ при этом равно 16. Тогда матрица $Z_{л}$ имеет следующий вид:

$$Z_{л} = \begin{bmatrix} R_{л} \\ X_{л} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.05 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.16 & 0.28 & 0.28 & 0.28 & 0.28 & 0.4 & 0.4 & 0.4 & 0.4 \\ 0.05 & 0.16 & 0.28 & 0.4 & 0.05 & 0.16 & 0.28 & 0.4 & 0.05 & 0.16 & 0.28 & 0.4 & 0.05 & 0.16 & 0.28 & 0.4 \end{bmatrix}.$$

Напряжение U_1 источника питания примем равным $400V$. Как было сказано выше, U_1 может изменяться под воздействием внешних факторов. Учтем это обстоятельство при вычислении текущих значений напряжения источника с помощью генератора случайных чисел, распределенных по нормальному закону с математическим ожиданием $M_{U_1} = 400V$ и среднеквадратичным отклонением σ_{U_1} . Этот параметр в процессе вычислений последовательно принимает значения, равные 1%, 2.5% и 5% от M_{U_1} , что соответствует амплитуде колебаний напряжения $\pm 2\%$, $\pm 5\%$ и $\pm 10\%$ [2].

Установленную мощность узла нагрузки S считаем равной 40кВА, 20кВА, 10кВА и 2кВА. Значения мощности подобраны таким образом, чтобы при минимальном сопротивлении питающей линии и максимальном значении

мощности (и наоборот) $\Delta U = 10\%$.

Для всех возможных комбинаций Z_L , σ_{U1} и S производится численное моделирование, алгоритм реализации которого включает в себя следующие этапы.

1. Определяется размер выборки данных $K = 4$.
2. Определяются стартовые значения σ_{U1} , Z_L , и S (в рассматриваемом примере $\sigma_{U1} = 1\%$, $Z_L = \begin{bmatrix} 0.05 \\ 0.05 \end{bmatrix}$, $S = 40 \text{кВА}$).

3. С помощью генератора случайных чисел формируется массив значений полной мощности (потребляемой нагрузкой) размерности K , с математическим ожиданием $M_S = S$ и среднеквадратичным отклонением $\sigma_S = S/2$.

4. Для каждого значения S аналогично пункту 5 определяется [9] коэффициент мощности $\cos\varphi$ с параметрами $M_{\cos\varphi} = 0,75$, $\sigma_{\cos\varphi} = 0,1$.

5. Выполняется расчет значений активной и реактивной мощности $P_2 = S\cos\varphi$, $Q_2 = S\sin\varphi$ потребляемых нагрузкой.

6. По формулам (1), (2) определяются текущее напряжение и ток в узле нагрузки, для текущих значений σ_{U1} , S , Z_L и K вычисляется матрица коэффициентов регрессии θ .

7. Производится сравнение коэффициентов регрессии θ с исходными значениями U_1 , R_L , X_L и вычисляется относительная ошибка по формулам

$$U'_1 = \frac{U_1^\theta}{U_1} \cdot 100\%, R'_L = \frac{R_L^\theta}{R_L} \cdot 100\%, X'_L = \frac{X_L^\theta}{X_L} \cdot 100\%.$$

8. С целью уменьшения статистической погрешности пункты 3 – 7 повторяются в цикле достаточное количество раз по завершению которого выбирается максимальное значение полученной ошибки.

9. Аналогично в цикле повторяются пункты 3 – 8 для каждого значения

сопротивления питающей линии Z_L .

10.Пункты 3 – 9 повторяются для каждого значения мощности узла нагрузки S , для каждого эксперимента определяется своя погрешность измерений.

11.Пункты 3 – 10 повторяются для каждого значения амплитуды колебаний напряжения σ_{U_1} , для каждого эксперимента определяется своя погрешность измерений.

12.Пункты 1 – 11 повторяются с большим K до тех пор, пока разница ошибки вычислений между текущим и предыдущим шагами не станет достаточно малой. Для каждого K определяется своя погрешность измерений.

В результате имеем матрицу коэффициентов регрессии θ для различных σ_{U_1} , S , Z_L и K и по полученным данным оценки точности вычисления значений U_1^θ , R_d^θ , X_L^θ строим представленные на рис. 2 – 4 графики зависимостей.

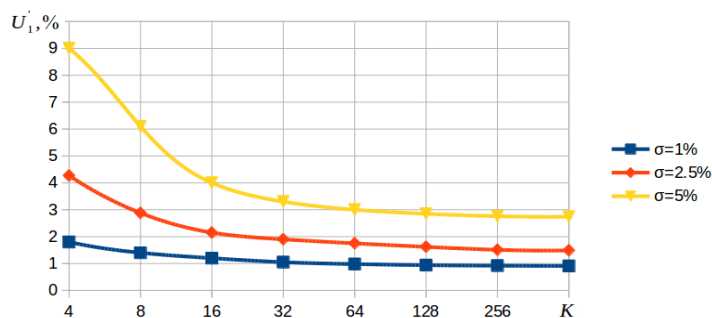


Рис. 2.

Зависимость погрешности U_1' от величины выборки данных K и среднеквадратичного отклонения σ .

Из рис. 2 следует, что точность вычисления значения напряжения перестает существенно увеличиваться при размере выборки от 32 и устанавливается в пределах 3% при колебаниях напряжения источника U_1 , не превосходящих 10%

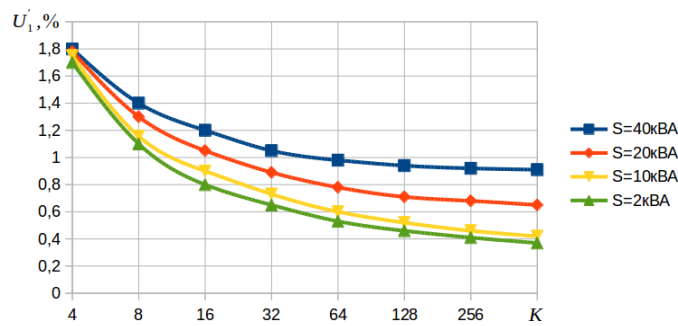


Рис. 3.

Зависимость погрешности U_1' , от величины выборки данных K установленной мощности нагрузки S при $U_1 \pm 2\%$.

Из рис 3 следует, что значение потребляемой мощности S несущественно сказывается на погрешности вычисления напряжения источника U_1 и при уменьшении S в 20 раз уменьшается только в два раза.

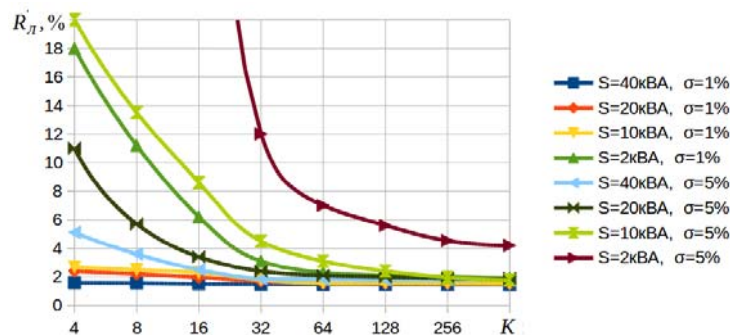


Рис. 4.

Зависимость погрешности $R_{д}'$ от величины выборки данных K установленной мощности нагрузки S и амплитуды колебаний напряжения σ_{U_1} .

В свою очередь, точность вычисления активного и реактивного сопротивлений имеет ярко выраженную обратную зависимость от мощности S (рис. 4). Это объясняется соизмеримостью значений падения напряжения на сопротивлении питающей линии и колебаний напряжения источника.

По результатам эксперимента можно сделать следующий вывод: практически приемлемая точность (5 %) вычисления напряжения в результате обучения достигается при количестве измерений K не менее 16, а для вычисления полного сопротивления питающей линии величина K должна быть не менее 128. После определения параметров источника

питания производится расчет коэффициентов усиления и постоянных времени звеньев объекта управления и регулятора [10]. Дальнейшее обучение требуется для обновления значения напряжения источника и производится по мере поступления очередных данных измерений.

Литература

1. Кондратьева Н.П., Юран С.И., Владыкин И.Р. и др. Инновационные энергосберегающие электроустановки для предприятий АПК Удмуртской Республики. // Инженерный вестник Дона, 2013, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1632.
2. Жежеленко И. В., Саенко Ю.Л. Показатели качества электроэнергии и их контроль на промышленных предприятиях. 3-е изд., перераб. и доп. - М.: Энергоатомиздат, 2000. 253 с.
3. Гуревич Ю.Е., Либова Л.Е. Применение математических моделей электрической нагрузки в расчетах энергосистем и надежности электроснабжения промышленных потребителей. М.: ЭЛЕКС КМ, 2008. 248 с.
4. Stedinger J. Negative binomial regression of electric power outages in hurricanes // Journal of infrastructure systems, 2005. December. pp. 258-267.
5. Змиева К.А., Хайро Д.А., Должникова Е.Ю. Снижение потерь и повышение качества электроэнергии за счет применения устройств корректировки параметров питающего напряжения электропотребителей // журнал «Электротехнические комплексы и системы управления». 2012. №3. с 16-21.
6. Зайцев А.И., Плехов А.С., Чувашин Е.Е. Альтернативные энергосберегающие источники реактивной мощности // Электротехнические комплексы и системы управления. 2011. №44. с 8-13.
7. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. Книга 1. В 2-х

книгах. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

8. Хрущев Ю.В., Панкратов А.В., Бацева Н.Л., Полищук В.И., Тавлинцев А.С. Методика идентификации статических характеристик нагрузки по результатам активного эксперимента // Известия Томского политехнического университета. Техника и технологии в энергетике. Т 325. 2014. №4. с 164-175.

9. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., etc Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review // Proceedings of the IEEE (vol 93, issue 12). 2005. pp. 2144-2164.

10. Кашканов А.О., Плехов А.С., Федосенко Ю.С. Математическая модель узла нагрузки с эквивалентным электроприемником // Инженерный вестник Дона, 2015, №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3119.

References

1. Kondrat'eva N.P., Yuran S.I., Vladykin I.R. i dr. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2013, №2 URL: ivdon.ru/magazine/archive/n2y2013/1632/.

2. Zhezhelenko I. V., Saenko Yu.L. Pokazateli kachestva elektroenergii i ikh kontrol' na promyshlennykh predpriyatiyakh [Power quality and it's control in industrial plants] 3-e izd., pererab. i dop. M.: Energoatomizdat, 2000. 253p.

3. Gurevich Yu.E., Libova L.E. Primenenie matematicheskikh modeley elektricheskoy nagruzki v raschetakh energosistem i nadezhnosti elektrosnabzheniya promyshlennykh potrebiteley [The use of mathematical models of the electrical load in the calculation of the reliability of power systems and power supply of industrial consumers]. M.: ELEKS KM, 2008. 248p.

4. Stedinger J. Negative binomial regression of electric power outages in hurricanes. Journal of infrastructure systems, 2005. December. pp. 258-267.

5. Zmieva K.A., Khayro D.A., Dolzhnikova E.Yu. Elektrotekhnicheskie komplekсы i sistemy upravleniya. 2012. №3. pp 16-21.

6. Zaytsev A.I., Plekhov A.S., Chuvashin E.E. Elektrotekhnicheskie komplekсы

i sistemy upravleniya. 2011. №44. pp 8-13.

7. Dreyper N., Smit G. Prikladnoy regressionnyy analiz.[The application of regression analysis] Kniga 1. V 2-h knigah. M.: Finansy i statistika, 1986. 366 p.

8. Khrushchev Yu.V., Pankratov A.V., Batseva N.L., Polishchuk V.I., Tavlintsev A.S. Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Tekhnika i tekhnologii v energetike. T 325. 2014. №4. pp. 164-175.

9. Dixon J., Moran L., Rodriguez J., etc Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review. Proceedings of the IEEE (vol 93, issue 12). 2005. pp. 2144-2164.

10. Kashkanov A.O., Plekhov A.S., Fedosenko Yu.S. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2015, №3, URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2015/3119.