УДК 621.316.94

Идентификация местоположения нелинейной электрической нагрузки

С.ПИРОГ¹, Я.Э.ШКЛЯРСКИЙ²✉, А.Н.СКАМЫН²✉

¹ AGH Научно-технический университет, Краков, Польша

² Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

В статье рассматриваются вопросы выявления местоположения нелинейной нагрузки в электрических сетях, вносящей основной вклад в искажения несинусоидальности напряжения и тока в распределительной сети промышленного предприятия, включая предприятия горнодобывающей отрасли. Рассмотрены существующие методы определения местоположения источника высших гармонических составляющих в напряжении и токе, выявлены их преимущества и недостатки. К основным недостаткам применяемых методов следует отнести невысокую точность и некорректность их использования на действующих предприятиях. При разработке нового метода перед авторами стояла задача простоты его использования в условиях промышленной эксплуатации электрооборудования и безусловной корректности полученных результатов. Предложенный метод выявления источника высших гармоник основан на варьировании параметров энергосистемы, в частности, изменении сопротивления силовых трансформаторов с учетом коэффициента их трансформации. Показано, что при варьировании коэффициента трансформации при регулировании под нагрузкой изменяется суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения. На основании построенных зависимостей проанализировано изменение производной данной функции при различных вариациях параметров источников высших гармоник и разработан метод, позволяющий определить долевого вклада потребителей в суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения.

Ключевые слова: высшие гармоники; электрическая сеть; потребитель; электрическая нагрузка; источник искажений; суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения; качество электроэнергии

Как цитировать эту статью: Пирог С. Идентификация местоположения нелинейной электрической нагрузки / С.Пирог, Я.Э.Шклярский, А.Н.Скамын // Записки Горного института. 2019. Т. 237. С. 317-321. DOI:10.31897/PMI.2019.3.317

Введение. Интенсивное распространение в целях энергосбережения и повышения производительности труда получили электроприемники с нелинейной вольт-амперной характеристикой, в которых применяется полупроводниковая преобразовательная техника [2, 10, 17]. Функционирование их основных модулей базируется на работе быстродействующих полупроводниковых ключей и является причиной сложных переходных процессов в системах. Вследствие этого из сети потребляется нелинейный ток, который создает падение напряжения несинусоидальной формы и приводит к появлению высших гармонических составляющих в питающем напряжении [4, 5]. Несинусоидальность в питающем напряжении может возникать как вследствие потребления нелинейного тока электротехническим комплексом самого предприятия, так и вследствие потребления нелинейного тока другими потребителями, подключенными к точке общего присоединения [3]. Вопросы идентификации нелинейной электрической нагрузки, а также их процентного содержания в суммарных показателях качества электроэнергии являются особенно актуальными и нерешенными на данный момент в России, так как до сих пор отсутствуют нормативные документы, регламентирующие порядок введения штрафных санкций как для потребителей, так и для представителей электрических сетей.

Целью работы является разработка метода выявления местоположения электрической нагрузки, ухудшающей показатели качества электроэнергии, относительно точки общего присоединения с детерминацией процентного содержания в суммарных показателях качества электроэнергии.

Постановка проблемы. В работах [12, 16] представлен способ определения источника гармонических искажений, базирующийся на методе активных двухполюсников. Такой способ имеет недостаток – при его использовании первоначально неизвестны данные по эквивалентным сопротивлениям сети и потребителя, которые определяются при проведении измерений, и на основе которых выявляется местоположение ухудшающего качество электроэнергии потребителя. Известен метод для однофазных сетей, основанный на определении знака и значения мощностей высших гармоник (метод потока активных мощностей), передаваемых от источника искажений в сеть [14]. На основе теории мощности [6, 9] такой метод был доработан и применен для многофазных систем, что отражено в работах [7, 8, 13]. Применение метода сопряжено с определением

углов фаз напряжения и тока на высших гармониках. В условиях с незначительным содержанием искажений такие измерения необходимо проводить средствами с очень высоким классом точности. Кроме этого, такой метод не позволяет определить процентное содержание и долевой вклад искажающего потребителя при разностороннем возникновении высших гармоник относительно точки общего присоединения.

Из этого следует, что на данный момент не существует устоявшегося и однозначного метода детерминации источника гармонических искажений в электрических сетях, особенно при условии их разностороннего возникновения относительно точки общего присоединения, что свидетельствует об актуальности исследований в рассматриваемой области.

Методика исследований. Как правило, на крупных производствах вводные силовые трансформаторы комплектуются средствами регулирования напряжения под нагрузкой, а трансформаторы отходящих подстанций устройствами переключения без возбуждения. Поскольку сопротивление обмоток трансформатора является преимущественно индуктивным, то варьирование коэффициента трансформации будет приводить к существенному изменению сопротивления протеканию токов на частотах выше основной, что отразится на суммарном коэффициенте гармонических составляющих напряжения (K_U).

При моделировании несинусоидальных режимов были использованы известные схемы замещения трансформатора [1], а именно схема замещения с магнитной связью и классическая Т-схема замещения с параллельным представлением ветви намагничивания. При моделировании не учитывались явления, возникающие вследствие насыщения сердечника трансформатора [11].

За основу расчетов была принята сформированная схема замещения электрической сети предприятия с учетом возникновения искажений со стороны потребителя и питающей сети, представленная на рис.1 [15].

Источники искажений со стороны питающей сети представлены в виде последовательно соединенных источников напряжения на соответствующей частоте. Источники искажений со стороны потребителя представлены в виде параллельно включенных источников тока на соответствующей частоте. Эквивалентная линейная электрическая нагрузка замещается параллельным соединением активного и индуктивного сопротивлений. Трансформатор представлен в виде Т-образной схемы замещения.

Научные и практические результаты. Моделирование осуществлялось с применением пакета прикладных программ MathCAD. Первоначально моделировались режимы работы сети при раздельном возникновении высших гармонических составляющих относительно потребителя электрической энергии и электрической сети. Были построены зависимости суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения от коэффициента трансформации K_T . Указанные зависимости для вторичной обмотки трансформатора (K_{U2}) представлены на рис.2.

Согласно полученным графикам можно сделать следующие выводы. Характер зависимостей практически линейный с минимальной долей выпуклости и вогнутости кривой. Возрастание или убывание функции позволяет обнаружить виновника нарушения синусоидальности напряжения, т.е. при наличии источника искажений со стороны потребителя с увеличением коэффициента трансформации возрастает суммарный коэффициент гармонических составляющих напряжения (изменение варьируется в пределах 25 %) и наоборот при наличии источника искажений со стороны сети (изменение варьируется в пределах 3 %). Коэффициент K_{U2} изменяется в пределах

Рис.1. Схема замещения электрической сети с учетом возникновения искажений со стороны потребителя и питающей сети

Рис.2. Зависимости K_{U2} от K_T при наличии искажений со стороны питающей сети (а) и со стороны потребителя (б)

Рис.3. Зависимости K_{U2} в относительных единицах от K_T при варьировании источника искажений со стороны питающей сети (а) и варьировании источника искажений со стороны нагрузки (б)

$$1 - K_{U2oe}(0, k); 2 - K_{U2oe}(0,5, k); 3 - K_{U2oe}(1, k); 4 - K_{U2oe}(1,5, k); 5 - K_{U2oe}(2, k)$$

25 % в случае с потребителем, ухудшающим качество электрической энергии, и в пределах 3 % в случае, если виновник искажений – питающая сеть. При этом коэффициент трансформации изменялся в пределах 0,9-1,1 от номинального коэффициента трансформации. При моделировании процессов параметры нелинейных электрических нагрузок выбирались, исходя из равенства суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения во вторичной обмотке.

Так как целью работы является обнаружение виновника гармонических искажений с определением их процентного содержания в суммарных показателях качества электроэнергии, то были построены аналогичные зависимости при одновременном варьировании параметров нелинейной электрической нагрузки со стороны сети и потребителя. График, соответствующий изменению параметров источника искажений со стороны питающей сети при постоянстве источника искажений со стороны нагрузки в относительных единицах, представлен на рис.3. Аналогичный график, соответствующий изменению параметров источника искажений со стороны нагрузки при постоянстве источника искажений со стороны питающей сети в относительных единицах, представлен на рис.4.

По построенным графикам достаточно сложно определить процентное содержание и долевой вклад источника искажений в суммарные показатели, поэтому были дополнительно проанализированы изменения производной данной функции при различных сочетаниях параметров нелинейной электрической нагрузки (рис.4). При этом был введен дополнительный коэффициент d , который характеризует долевой вклад источника искажений в суммарные показатели. Другими словами, это коэффициент, пропорционально которому возрастает вклад источника искажений со стороны сети (потребителя) при постоянстве искажений, возникающих со стороны потребителя (сети).

Рис.4. Зависимости производной K'_{U2} от коэффициента d при увеличении искажений со стороны системы (а) и нагрузки (б)

Из полученных графиков следует, что производная $K'(d)$ является возрастающей функцией (угол наклона функции увеличивается) при увеличении доли искажений со стороны потребителя и является убывающей функцией при возрастании доли искажений со стороны питающей сети. Установлено, что производная $K'(d)$ не изменяется при одновременном пропорциональном изменении искажений со стороны сети и потребителя, изменяются лишь количественные показатели суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения. Таким образом можно заключить, что производная $K'(d)$ является критерием, позволяющим определить процентное содержание и долевого вклад в общие искажения.

Выводы. Анализ изменения производной K'_{U2} по K_t в зависимости от введенного коэффициента d , соответствующего долевого вкладу источника искажений в суммарные показатели, позволил выявить, что производная минимальна и имеет отрицательное значение при наличии источника искажений исключительно со стороны системы, по мере увеличения процентного содержания гармоник со стороны потребителя производная возрастает и принимает максимальное значение при возникновении искажений исключительно со стороны нагрузки. Необходимо отметить, что значения производной соответствуют типу и параметрам исследуемого трансформатора, а также зависят от параметров системы и линейной электрической нагрузки, однако всегда имеют положительную тенденцию при увеличении процентного содержания гармоник со стороны потребителя и (или) уменьшении вклада со стороны системы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кацман М.М. Справочник по электрическим машинам. М.: Академия, 2005. 480 с.
2. Шклярский Я.Э. Влияние графика нагрузки на потери в электрической сети предприятия / Я.Э.Шклярский, С.Пирог // Записки Горного института. 2016. Т. 222. С.859-863. DOI: 10.18454/PMI.2016.6.859
3. Шклярский Я.Э. Способы уменьшения влияния высших гармоник на работу электрооборудования / Я.Э.Шклярский, А.Н.Скамьин // Записки Горного института. 2011. Т. 189. С. 121-124.
4. Abramovich B.N. Protective Controller against Cascade Outages with Selective Harmonic Compensation Function / B.N.Abramovich, P.A.Kuznetsov, Y.A.Sychev // Journal of Physics: Conference Series. 2018. Vol. 1015(2). № 022001.
5. A new two points method for identify dominant harmonic disturbance using frequency and phase spectrogram / M.H.Jopri, N.A.Abidullah, G.Z.Peng, A.R.Abdullah // International Review of Electrical Engineering. 2014. Vol. 9(2). P. 453-459.
6. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H.Akagi, E.H.Watanabe, M.Aredes. Piscataway, USA: IEEE Press, 2009. 389 p.
7. Czarnecki L.S. Current and power equations at bidirectional flow of harmonic active power in circuits with rotating machines // European Transactions on Electrical Power. 1993. Vol. 1. P. 45-52. DOI: 10.1002/etep.4450030108
8. Some remarks to active and fictitious power in polyphase and single-phase systems // European Transactions on Electrical Power. 1993. Vol. 1. P. 15-19. DOI: 10.1002/etep.4450030104
9. Frize S. Active and Apparent power in non-sinusoidal systems // Przegląd Electrot. 1931. Vol. 7. P. 193-203.
10. Koptev V.Y. Structure of energy consumption and improving open-pit dump truck efficiency / V.Y.Koptev, A.V.Kopteva // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 2. № 022010. DOI: 10.1088/1755-1315/87/2/022010
11. Masoum M.A.S. Power Quality in Power Systems and Electrical Machines / M.A.S.Masoum, E.Fuchs. San Diego, USA: Academic Press Elsevier, 2008. 1140 p.

12. New Power-Quality Assessment Criteria for Supply Systems under Unbalanced and Nonsinusoidal conditions / A.Dellapos, M.Marinelli, V.G.Monopoli, P.Zanchetta // IEEE Trans. on Power Delivery. 2004. Vol. 19(3). P. 1284-1290.
13. On the meaning of the Park power components in the three-phase systems under nonsinusoidal conditions / A.Ferrero, A.P.Morando, R.Ottoboni, G.Superti-Furga // European Transactions on Electrical Power. 1993. Vol. 1. P. 33-43. DOI: 10.1002/etep.4450030107
14. Sasdelli R. Considerations on power definitions on nonsinusoidal conditions/ R.Sasdelli, A.Menchetti, G.C.Montanari // IMECO TC-4 5th Int. Symp. Vienna, Austria, 1993. P. 285-293.
15. Skamyin A.N. Reactive power compensation considering high harmonics generation from internal and external nonlinear load / A.N.Skamyin, A.A.Belsky // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2017. Vol. 87. Iss. 3. № 032043. DOI: 10.1088/1755-1315/87/3/032043
16. Srinivasan K. Conforming and Nonconforming Current for Attributing Steady State Power Quality Problems / K.Srinivasan, R.Jutras // IEEE Trans. on Power Delivery. 1998. Vol. 13(1). P. 212-217.
17. Zhukovskiy Y.L. Diagnostics and evaluation of the residual life of an induction motor according to energy parameters / Y.L.Zhukovskiy, N.I.Koteleva // Journal of Physics: Conf. Series. 2018. Vol. 1050(1). № 12106. DOI: 10.1088/1742-6596/1050/1/012106

Авторы: С.Пирог, д-р техн. наук, профессор, pirog@agh.edu.pl (AGH Научно-технический университет, Краков, Польша), Я.Э.Шклярский, д-р техн. наук, профессор, js-10@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), А.Н.Скамьин, канд. техн. наук, доцент, skamin_an@pers.spmi.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 5.11.2018.

Статья принята к публикации 16.01.2019.