

Ранжирование потребителей подстанции по степени влияния на несимметрию напряжения в условиях дефицита исходных данных

ДВОРКИН Д.В., ТУЛЬСКИЙ В.Н., ПАЛИС Ш.

Рассмотрен подход, позволяющий провести оценку степени влияния электроприемников потребителей на искажение симметрии напряжения в точке общего присоединения подстанции, основанный на анализе установившегося режима работы ее эквивалентной электрической схемы замещения Тевенина исследуемой последовательности. Обосновано, что предложенный подход позволяет провести ранжирование потребителей подстанции по степени их влияния на значение несимметрии напряжения обратной и(или) нулевой последовательности в точке общего присоединения, как и ранее представленные методы [1], но требует меньшего числа исходных данных. Показано, что для применения предложенного подхода достаточно синхронных измерений комплексных значений трехфазных токов и напряжений в границах рассматриваемой подстанции, что является весомым аргументом в пользу возможности его использования на практике.

Ключевые слова: подстанции, потребители, точка общего присоединения, качество электроэнергии, несимметрия напряжения

Формируя представление о понятии фактического вклада (ФВ) следует учесть тот факт, что в настоящее время не существует его узаконенного определения. Ни в отечественной, ни в зарубежной литературе не существует такого нормативного документа, который однозначно диктует определение ФВ [1–3]. При этом устоявшееся «академическое» понятие существует с прошлого века, в границах которого по настоящее время работает научное сообщество – это некоторая характеристика потребителя, описывающая долю его влияния на ухудшение качества электрической энергии (КЭЭ) в точке общего присоединения (ТОП). При работе с показателями качества электроэнергии (ПКЭ), связанными с несимметрией напряжения, это определение можно сформулировать как долю влияния потребителя на значение напряжения обратной или нулевой последовательности в ТОП. В статье рассматривается метод, позволяющий оценить это влияние при решении задач:

поиск оптимального места установки компенсирующих устройств;

повышение наблюдаемости энергосистемы;

в перспективе – урегулирование имущественных споров, связанных с поставкой электрической энергии ненадлежащего качества.

В [1] представлены методы, позволяющие оценить ФВ i -го потребителя подстанции (ПС) на основе различных подходов в обработке исходных данных – первичных измерений. При этом все эти методы отличает два качества:

1) они применимы в условиях избытка исходных данных;

2) каждый метод выделяет свой параметр, в долях которого оценивается ФВ потребителя; в общем виде можно выделить четыре параметра: напряжение; ток; активная, реактивная или полная мощность; проводимость и(или) сопротивление.

Поскольку [4] нормирует два ПКЭ – коэффициенты несимметрии напряжения обратной и нулевой последовательности:

$$K_{2U} = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} 100\%; \quad K_{0U} = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} 100\%, \quad (1)$$

наиболее обоснованным видится применение тех методов, которые ранжируют потребителей ПС по ФВ, выраженному в долях напряжения:

$$D_{1(m)}^U \geq \dots \geq D_{j(m)}^U \geq \dots \geq D_{\eta(m)}^U, \quad (2)$$

где η – число потребителей ПС, искажающих симметрию напряжения в ТОП, $D_{j(m)}^U$ – ФВ j -го потребителя в значение напряжения последовательности m , выраженное в долях напряжения.

Эталонный подход. На рис. 1 представлена схема замещения Тевенина (СЗТ) последовательности m ПС с n потребителями, из которых (потребители с порядковым индексом j) искажают симметрию напряжения в ТОП и представлены ветвями с ЭДС искажений, а μ потребителей (потребители с порядковым индексом i) не вносят искажений и представлены пассивными ветвями без ЭДС. Поскольку источником искажений может являться и внешняя сеть, питающая ПС, то в эквивалентной ей ветви СЗТ также присутствует ЭДС.

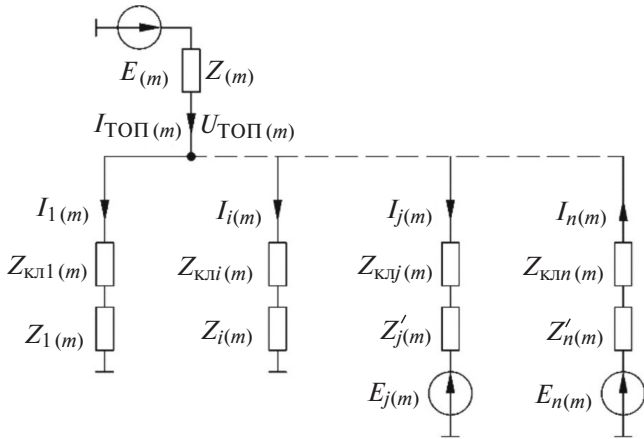


Рис. 1. СЗТ ПС последовательности m : $E_{(m)}$ и $Z_{(m)}$ – ЭДС искажения и сопротивление внешней сети; $Z_{кл1(m)}$ и $Z_{кли(m)}$ – сопротивления кабельных линий (КЛ) i -х и j -х фидеров; $Z_{i(m)}$ – нагрузка i -го потребителя; $E_{j(m)}$ и $Z'_{j(m)}$ ЭДС искажения и сопротивление сети j -го потребителя

Зная значения всех сопротивлений и всех ЭДС, возможно определить значение напряжения последовательности m , создаваемое каждой ЭДС в СЗТ:

$$\begin{aligned} \bar{U}_{ТОП(m)}^{(E_j)} &= \bar{E}_{j(m)} - \frac{\bar{E}_{j(m)} (\bar{Z}_{клj(m)} + Z'_{эkj(m)})}{Z_{клj(m)} + Z'_{эkj(m)} + \bar{Z}_{эkj(m)}} = \\ &= \bar{E}_{j(m)} - \frac{\bar{E}_{j(m)} \bar{Z}'_{j(m)} + Z'_{эkj(m)}}{\bar{Z}'_{j(m)} + \bar{Z}_{эkj(m)}}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $Z_{эkj(m)}$ – входное сопротивление j -й ЭДС без учета $\bar{Z}'_{j(m)}$ в j -й ветви.

Зная векторное значение по (3) для каждой ЭДС, строится векторная диаграмма (рис. 2).

Из диаграммы становится очевидным, что ФВ j -го потребителя равен:

$$D_{j(m)}^U = \frac{\left| \bar{U}_{ТОП(m)}^{(E_j)} \cos(\varphi_{U_{ТОП(m)}^{(E_j)}} - \varphi_{U_{ТОП(m)}}) \right|}{\left| U_{ТОП(m)} \right|} 100\%. \quad (4)$$

Определив ФВ каждой ЭДС в СЗТ по (4), можно составить неравенство (2), получив полное представление о влиянии всех источников искажений на несимметрию напряжения в ТОП. На прак-

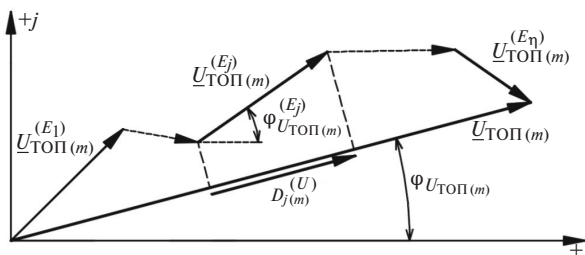


Рис. 2. Векторная диаграмма ФВ

тике, однако, существует ряд причин, затрудняющих применения данного подхода:

1) точно определить сопротивления КЛ и внешней сети для последовательности m в реальных условиях трудно [5];

2) из измерений на ПС невозможно определить значения ЭДС искажений всех ветвей.

Таким образом, применение данного подхода на практике сопровождается рядом проблем, устранение которых не гарантировано.

Альтернативный подход. Предлагается рассмотреть альтернативный подход оценки влияния потребителей на несимметрию напряжения в ТОП, который в явном виде не требует знания точных значений параметров сопротивлений и ЭДС, но позволяет их учесть.

Для этого СЗТ удобно привести к схеме трех подсистем (рис. 3). Пассивной подсистемы S_1 , эквивалентной всем симметричным потребителям (СП), не вносящим искажения; Подсистем S_2 и S_3 , эквивалентных всем искажающим нагрузкам, активная мощность в ветви которых протекает в сторону ТОП (положительное направление) и от нее (отрицательное направление) соответственно.

Сопротивления $Z_{(m)}^+$ и $Z_{(m)}^-$ характеризуют электрическую удаленность от ТОП ЭДС $E_{(m)}^+$ и $E_{(m)}^-$ соответственно (по аналогии с $Z'_{j(m)}$ в СЗТ на рис. 1).

Задавая положительное и отрицательное направления активных мощностей, можно сформулировать закон изменения полных мощностей в зоне измерения:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{U(m)}^{(+)} &= \bar{S}_{E(m)}^{(+)} - \Delta \bar{S}^{(+)}; \\ \bar{S}_{U(m)}^{(-)} &= \bar{S}_{E(m)}^{(-)} - \Delta \bar{S}^{(-)}; \\ \bar{S}_{U(m)}^{(+)} &= \bar{S}_{U(m)}^{(-)} + \bar{S}_{сп(m)}. \end{aligned} \quad (5)$$

Полученные по (5) значения полных мощностей в ветвях подсистем в зоне измерения не являются их ФВ, но, зная их, можно качественно оценить влияние каждой подсистемы на несимметрию напряжения в ТОП. Для этого рассматривается СЗТ отдельно для каждой ЭДС (рис. 4).

Каждая ЭДС генерирует мощность согласно выражениям:

$$\begin{aligned} \bar{S}_{E^{(+)}} - \Delta \bar{S}_{(m)}^{(+)} - \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} - \bar{S}_{спE^{(+)}}^{(-)} &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} - \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} - \bar{S}_{спE^{(+)}}^{(+)} &= 0; \\ \bar{S}_{E^{(-)}} - \Delta \bar{S}_{(m)}^{(-)} - \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} - \bar{S}_{спE^{(-)}}^{(+)} &= 0 \rightarrow \\ \rightarrow \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)} - \bar{S}_{спE^{(-)}}^{(-)} &= 0, \end{aligned} \quad (6)$$

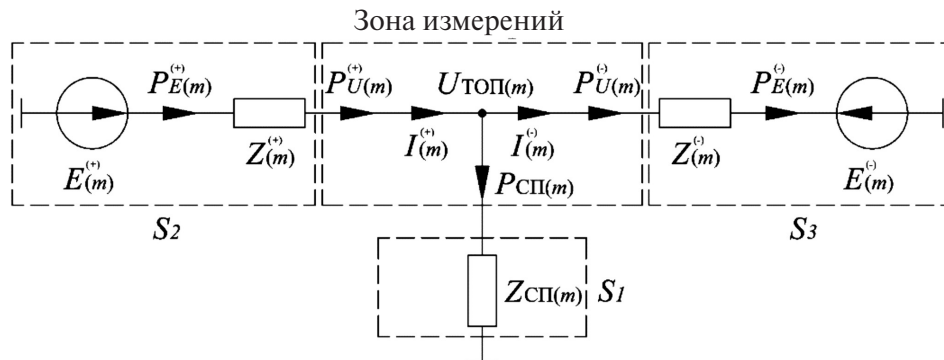


Рис. 3. Преобразованная СЗТ ПС последовательности m : $Z_{СП(m)}$ – сопротивление подсистемы S_1 ; $E_{(m)}^+$ и $Z_{(m)}^+$ – ЭДС и сопротивление подсистемы S_2 ; $E_{(m)}^-$ и $Z_{(m)}^-$ – ЭДС и сопротивление подсистемы S_3

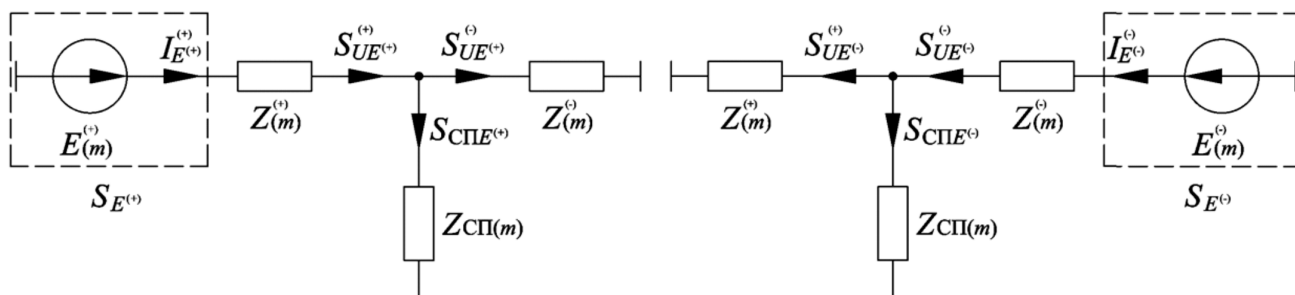


Рис. 4. СЗТ для каждой ЭДС в отдельности

которые можно выразить через параметры СЗТ:

$$\bar{E}_{(m)}^{(+)} \bar{I}_{E^{(+)}}^{(+)} - (\bar{I}_{E^{(+)}}^{(+)})^2 \left(\bar{Z}_{(m)}^{(+)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(-)} \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(-)}} \right) = 0; \quad (7)$$

$$\bar{E}_{(m)}^{(-)} \bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)} - (\bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)})^2 \left(\bar{Z}_{(m)}^{(-)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(+)} \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(+)}} \right) = 0, \quad (8)$$

где $\bar{I}_{E^{(+)}}^{(+)}$ и $\bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)}$ – токи в ветвях ЭДС, определяемые по выражениям:

$$\bar{I}_{E^{(+)}}^{(+)} = \frac{\bar{E}_{(m)}^{(+)}}{\bar{Z}_{(m)}^{(+)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(-)} \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(-)}}}; \quad (9)$$

$$\bar{I}_{E^{(-)}}^{(-)} = \frac{\bar{E}_{(m)}^{(-)}}{\bar{Z}_{(m)}^{(-)} + \frac{\bar{Z}_{(m)}^{(+)} \bar{Z}_{СП(m)}}{\bar{Z}_{СП(m)} + \bar{Z}_{(m)}^{(+)}}}$$

Используя выражения (5), (6), (7) и (8), можно заключить, что:

$$\bar{S}_{U(m)}^{(+)} = \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)} > 0 \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(+)} > \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(+)}; \quad (10)$$

$$-\bar{S}_{U(m)}^{(-)} = \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} - \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)} < 0 \rightarrow \bar{S}_{UE^{(+)}}^{(-)} > \bar{S}_{UE^{(-)}}^{(-)}, \quad (11)$$

т.е. мощность искажений, генерируемая подсистемой S_2 , больше мощности искажений, генерируемой подсистемой S_3 . Так можно качественно оценить влияние двух подсистем в долях мощности, аналогично неравенству (2):

$$D_{S2(m)}^S > D_{S3(m)}^S. \quad (12)$$

Таким образом, предложенный подход не дает количественной оценки ФВ подсистем, но способен оценить, какая из подсистем вносит больший ФВ.

Поскольку обе подсистемы эквивалентны группе потребителей, то необходимо провести ранжирование потребителей в каждой группе по степени их влияния (рис. 5).

Из закона Кирхгофа очевидно, что измеренные мощности $S_{U(m)}^{(+)}$ и $S_{U(m)}^{(-)}$ являются суммами мощностей, генерируемых ЭДС подсистем, каждую из которых можно определить по выражениям:

$$S_{U_j}^{(S_2)} = \frac{\bar{U}_{ТОП}^2 + \bar{U}_{ТОП} \bar{E}_j}{\bar{Z}_j}; \quad (13)$$

$$S_{U_j}^{(S_3)} = \frac{\bar{U}_{ТОП}^2 + \bar{U}_{ТОП} \bar{E}_j}{\bar{Z}_j}.$$

В (13), как и ранее рассмотренные в (6) мощности не отражают ФВ каждой ветви, но по ним можно косвенно оценить влияние каждой вет-

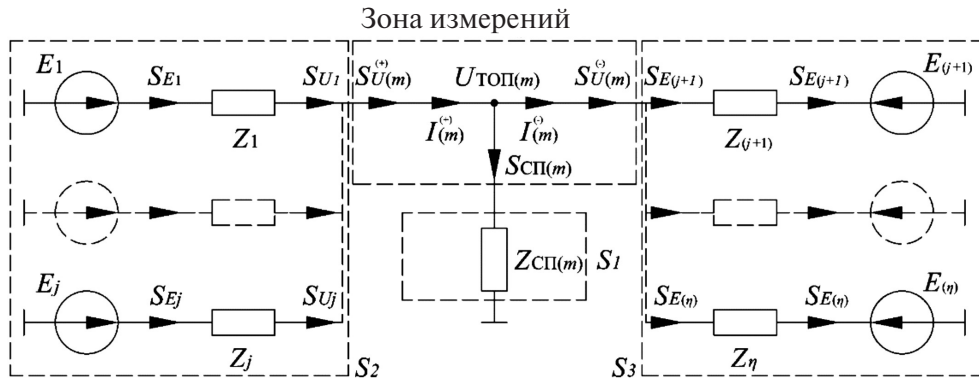


Рис. 5. СЗТ ПС с подсистемами S_1 и S_3 в раскрытой форме

ви внутри подсистемы. На примере двух ветвей в подсистеме S_2 из отношений мощностей

$$\frac{|S_{U_j}^{(S_2)}|}{|S_{U_{j+1}}^{(S_2)}|} = \frac{|\bar{Z}_{j+1}|}{|\bar{Z}_j|} \left| \frac{\bar{U}_{ТОП}^2 + \bar{U}_{ТОП} \bar{E}_j}{\bar{U}_{ТОП}^2 + \bar{U}_{ТОП} \bar{E}_{j+1}} \right| \quad (14)$$

нельзя сделать однозначный вывод о соотношении значений ЭДС и сопротивлений ветвей. Пусть при равных значениях сопротивлений значения ЭДС удовлетворяют неравенству

$$E_j > E_{j+1},$$

тогда генерируемая мощность в ветви j -го потребителя больше, чем ветви $(j+1)$ -го. Если при равных значениях ЭДС сопротивления ветвей $Z_j < Z_{j+1}$, то потери мощности в ветви j -го потребителя меньше, чем ветви $(j+1)$ -го, и наоборот. Возможна и неоднозначная ситуация, когда

$$E_j > E_{j+1}, Z_j > Z_{j+1}.$$

При этом кумулятивный эффект влияния от соотношения этих параметров выражается значением измеренной полной мощности в ТОП, и если

$$\left| \frac{\bar{S}_{U_j}^{(S_2)}}{\bar{S}_{U_{j+1}}^{(S_2)}} \right| > 1, \quad (15)$$

то значения ФВ в долях мощности для этих двух ветвей имеют соотношение

$$D_{j(m)}^{S_2} > D_{j+1(m)}^{S_2}. \quad (16)$$

Для дефицитной подсистемы справедливы представленные выводы, но неравенство (15) инверсно, т.е. если

$$\left| \frac{\bar{S}_{U_j}^{(S_3)}}{\bar{S}_{U_{j+1}}^{(S_3)}} \right| < 1, \quad (17)$$

то значения ФВ двух ветвей в долях мощности имеют соотношение

$$D_{j(m)}^{S_3} > D_{j+1(m)}^{S_3}. \quad (18)$$

Составив неравенства (16) и (18) для всех искажающих потребителей ПС, можно составить неравенство, аналогичное (2) в долях мощности:

$$D_{1(m)}^S > \dots > D_{j(m)}^S > \dots > D_{\eta(m)}^S. \quad (19)$$

Оценка обоснованности предложенного подхода.

Необходимо оценить соответствие решений по (2) и (19), т.е. нужно оценить влияние параметров СЗТ на значения ФВ, определяемых из (3), (4) и (15), (17):

1. ЭДС искажения j -й ветви. Уравнения (3), (4), (15) и (17) линейно зависят от значения ЭДС рассматриваемой ветви. Причем, если $E_j \rightarrow 0$, то и $D_j^S \rightarrow 0\%$. Если $E_j \rightarrow \infty$, то D_j^U и $D_j^S \rightarrow 100$, т.е. изменение этого параметра идентично влияет на значение ФВ в эталонном и предлагаемом решении.

2. Электрическая удаленность источника искажений j -го фидера от ТОП. Уравнения (3), (4), (15) и (17) гиперболически зависят от значения ЭДС рассматриваемой ветви, т.е. изменение этого параметра идентично влияет на значение ФВ в эталонном и предлагаемом решении.

Если $Z'_{j(m)} \rightarrow 0$ в (3) или $Z_{(m)}^{(+)}, Z_{(m)}^{(-)} \rightarrow 0$ в (15) и (17), то D_j^U и $D_j^S \rightarrow 100$. Напротив, если $Z'_{j(m)} \rightarrow \infty$ в (3) или $Z_{(m)}^{(+)}, Z_{(m)}^{(-)} \rightarrow \infty$ в (16) и (18), то ФВ j -й ЭДС в долях напряжения и полной мощности, $D_j^U \rightarrow 0$ и $D_j^S \rightarrow 0$.

3. Характеристика внешней сети для j -го фидера, определяемая параметром $Z_{экj(m)}$. При $Z_{экj(m)} \rightarrow 0$ для j -го фидера ФВ в долях напряжения и полной мощности, $D_j^U \rightarrow 0$ и $D_j^S \rightarrow 0$, и наоборот.

Формирование СЗТ. Изначально в СЗТ (рис. 1, 3–5) полагалось, что состав искажающих нагрузок известен, что позволило разделить потребителей на

две группы – потребителей с ЭДС искажений в их ветвях и без ЭДС. Ранее в [6] был представлен подход по формированию СЗТ на основе первичных измерений. Применение предложенного в статье подхода требует предварительного использования метода в [6].

Выводы. Таким образом, предложенный подход учитывает те же параметры СЗТ, что и эталонный, но не требует их точного определения, что существенно упрощает его применение на практике. Следует отметить следующее.

1. Методы требуют разного набора исходных данных для анализа:

Метод	Параметры	
	режима	СЗТ
Эталонный	$U_{\text{ТОП}(m)}; I_{i(m)};$ $I_{j(m)}$	$Z_{\text{КА}i(m)}; Z_{\text{КА}j(m)};$ $Z_{i(m)}; Z'_{j(m)}$
Предлагаемый	То же	–

Видно, что предложенный подход требует меньше исходных данных.

Неравенство (19) не эквивалентно неравенству (2), поскольку последнее дает количественную оценку ФВ всех потребителей, а (19) – способно лишь ранжировать потребителей по их ФВ от большего к меньшему.

Очевидно, что результат (19) уступает результату (2) в полноте представления о влиянии всех источников искажений на несимметрию напряжения в ТОП. Но, используя предложенный подход, можно определить доминирующий источник искажения, т.е. предлагается устранять искажения симметрии напряжения в ТОП последовательно, компенсируя в первой итерации искажения от самого мощного источника; во второй – искажения от самого мощного источника в новой СЗТ и т. д., пока значения по (1) не станут соответствовать требованиям [4].

Авторы статьи выражают благодарность Национальному исследовательскому университету «МЭИ» (Москва, Россия), Институту имени Отто фон Герике (Магдебург,

Германия) за помощь в работе над представленной статьёй.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия Госадания «Инициативные научные проекты» (уникальный идентификатор проекта 13.8546.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дворкин Д.В., Силаев М.А., Тульский В.Н., Палис Ш. Проблемы оценки вклада потребителя в искажение качества электрической энергии – Электричество, 2017, No. 7, с. 12–19.
2. Чэпмэн Д. Цена низкого КЭ. – Энергосбережение, 2004, No. 1, с. 66–69.
3. Гамазин С.И., Пётрович В.А. Определение фактического вклада потребителя в искажение параметров качества электрической энергии. – Промышленная энергетика, 2003, No. 1, с. 32–38.
4. ГОСТ 32144–2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, 2014.
5. Неклепаев Б.П., Крючков И.П. Электрическая часть электростанций и подстанций: Справочные данные для курсового и дипломного проектирования: Учебное пос. для вузов. М: Энергоатомиздат, 1989, 608 с.
6. Dvorkin D., Palis S., Silaev M., Tulsy V. Balanced Load Identification Based On The Correlation Of The Phase Currents. – IEEE 58th Intern. Scientific Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 12–13 Oct. 2017.

[28.03.2018]

Авторы: Дворкин Дмитрий Валентинович окончил магистратуру «Национального исследовательского университета «Московский энергетический институт» («НИУ «МЭИ») в 2014 г. Научный работник Университета имени Отто фон Герике (Магдебург, Германия). Аспирант Института электроэнергетики «НИУ «МЭИ».

Тульский Владимир Николаевич окончил «НИУ «МЭИ» в 2001 г. В 2004 г. защитил кандидатскую диссертацию «Развитие методики определения физического вклада при оценке качества электрической энергии в точке общего присоединения». Директор Института электроэнергетики «НИУ «МЭИ».

Штефан Палис – профессор кафедры FEIT Университета имени Отто фон Герике (Магдебург, Германия).

The Consumer Scoring Based on Their Impacts on the Voltage Imbalance

DVORKIN Dmitry V. (University named Otto fon Guericke, Magdeburg, Germany; National Research University «Moscow Power Engineering Institute» – «NRU «MPEI»), Moscow, Russia) – Scientist; PhD Student

TUL'SKII Vladimir N. («NRU «MPEI», Moscow, Russia) – Associate Professor, Cand. Sci. (Eng.)

PALIS Stefan (*Otto von Guericke University, Magdeburg, Germany*) – Professor, Dr.-Ing.

A method allowing scoring a substation's consumer based on their impact on the voltage imbalance at the point of common coupling has been described. It uses Tevin's equivalent electrical scheme of the substation for a frequency of the considered sequence. It has been proved that the proposed method allows to score the consumers (in accordance with their actual influence on values of negative and (or) zero voltages at the point of common coupling) as effective as any method from the reference list of [1]. However, it needs less initial data (synchronized three-phase currents and voltages) reaching from the measurements at the substation territory only which makes it more useful in practice.

К е у w o r d s: *substations, consumers, point of common coupling, power quality, voltage unsymmetry*

REFERENCES

1. **Dvorkin D.V., Silayev M.A., Tul'sky V.N., Palis Sh.** *Elektrichestvo – in Russ. (Electricity)*, 2017, No. 7, pp. 12–19.
2. **Chapman D.** *Energoberezheniye – in Russ. (Energy-savings)*, 2004, No.1, pp. 66–69.
3. **Gamazin S.I. Petrovich V.A.** *Promyshlennaya energetika – in Russ. (Industrial Power Engineering)*, 2003, No. 1, pp. 32–38.
4. **GOST 32144–2013.** *Elektricheskaya energiya. Sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv elektromagnitnaya....* (Electric energy/ Electromagnetic compability of technical equipments....). Moscow, 2014.
5. **Neklepayev B.P., Kryuchkov I.P.** *Elektricheskaya chast' elektrostantsii i podstantsii: Spravochnye dannye.... Uchebnoye pos. dlya vusov.* (Electric part of power stations and substations: Inquiry data. Train aid for institutions of higher learning). Moscow, Publ. Energoatomizdat, 1989, 608 p.
6. **Dvorkin D., Palis S., Silaev M., Tulskey V.** *Balanced Load Identification Based On The Correlation Of The Phase Currents.* – IEEE 58th Intern. Scientific Conf. on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, 12–13 Oct. 2017.

[28.03.2018]