

УДК 621.311

**КАЧЕСТВО ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ, СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ
НАПРЯЖЕНИЯ
ELECTRICAL POWER QUALITY, WAYS TO INCREASE VOLTAGE**

П.С. Рудик

Научный руководитель – И.В. Колосова, старший преподаватель.
Белорусский национальный технический университет, г. Минск

P. Rudik

Supervisor – I. Kolosova, Senior Lecturer
Belarusian national technical university, Minsk

***Аннотация:** в статье отражены показатели качества электрической энергии, рассмотрен один из показателей: отклонение напряжения, на примере представлены способы повышения напряжения на зажимах наиболее удалённого электроприёмника, использование РПН, ПБВ трансформаторов и поперечной компенсации.*

***Abstract:** the article reflects the indicators of electrical energy, considers one of the indicators: voltage deviation, by example presents ways to increase the voltage at the terminals of the most remote electrical receiver: the use of RPN, PBV transformers and t of transverse compensation.*

***Ключевые слова:** показатели, качество, напряжение.*

***Keywords:** indicators, quality, voltage.*

Введение

Проблема качества электрической энергии (ЭЭ) становится всё более актуальной с ростом мощностей групп электрических приёмников (ЭП), имеющих разнопеременный характер нагрузки, появление ЭП с нелинейной вольтамперной характеристикой, а также приёмников чувствительных к изменениям параметров сети. С 1.02. 2016 г. вступил в силу ГОСТ32144-2013, который определил нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения (СЭС) общего назначения, заменив ГОСТ13109-97.

Под качеством электроэнергии (КЭ) понимается степень соответствия параметров электрической энергии установленным значениям. Настоящий стандарт нормирует не все показатели, описанные в нём в виду непредсказуемости ряда явлений, оказывающих влияние на напряжение, на данный момент установлено 11 основных [2]:

- установившееся отклонение напряжения;
- размах изменения напряжения (доза колебаний напряжений);
- доза фликера (мерцания);
- коэффициент несинусоидальности кривой напряжения;
- коэффициент n -й гармонической составляющей напряжения нечетного (четного) порядка;
- коэффициент обратной последовательности напряжений;
- коэффициент нулевой последовательности напряжений;
- длительность провала напряжения;

- импульсное напряжение;
- коэффициент временного перенапряжения;
- отклонение частоты.

Из-за некачественной ЭЭ наблюдается такое явление, как ущерб, который влечёт дополнительные затраты на эксплуатацию оборудования, преждевременное старение изоляции, ложное срабатывание устройств релейной защиты, недоотпуск продукции и т.д.

Рассмотрим более подробно установившееся отклонение напряжения и способы его регулирования в рамках промышленных предприятий.

Основная часть

Одним из значимых показателей характеризующих надёжную работу СЭС является установившееся отклонение напряжения. ГОСТ 32144-2013 определил данную проблему, как медленное изменение напряжения (продолжительностью более 1 мин), которое обусловлено обычно изменением нагрузки электрической сети. Показателями КЭ относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное отклонение $\delta U_{(+)}$ в точке передачи электрической энергии от номинального(согласованного значения) [3]

$$\delta U_{(-)} = \frac{U_0 - U_{m(-)}}{U_0} \cdot 100; \quad (0.1)$$

$$\delta U_{(+)} = \frac{U_{m(+)} - U_0}{U_0} \cdot 100, \quad (0.2)$$

где $U_{m(-)}, U_{m(+)}$ - значения напряжения электропитания, меньшие и большие соответственно, усредненные в интервале времени 10 мин в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.30.

Отрицательное отклонение напряжения (underdeviation) -это абсолютное значение разности между измеренными и номинальными величинами напряжения в случае, когда измеренное меньше номинального значения, %.

Положительное отклонение напряжения (overdeviation) -это разность между измеренным и номинальным значениями напряжения в случае, когда измеренное больше номинального значения [3].

В качестве действительного напряжения принимают напряжение прямой последовательности основной частоты, нормально допустимые значения отклонения напряжения составляют $\pm 5\%$, а предельно допустимые $\pm 10\%$. На практике обычно решается задача определения отклонения напряжения на границе балансовой принадлежности. На промышленном предприятии производят определение значения напряжения на самом удалённом электроприёмнике и, если необходимо, разрабатывают мероприятия по регулированию напряжения на этом ЭП до величины близкой к $U_{ном}$. Рассмотрим пример электроснабжения удалённого электроприёмника и на нём покажем какие существуют методы по регулированию напряжения.

Схема питания самого удалённого ЭП представлена на рисунке 1.

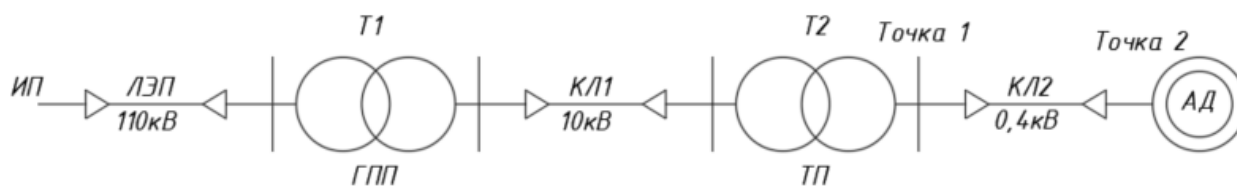


Рисунок 1- схема питания самого удалённого электроприёмника: ЛЭП 110кВ: А1-150, l=25км; Т1(ГПП): ТРДН40000/110; Т2: ТМГ32-1600/10; КЛ1 10кВ: АПвПу 3×120-10, l=0,6км; КЛ2 0,4кВ: АВВГ 5×50-1, l=0,3км; АД: АИР225М4, P_н=55 кВт.

Расчёт показал следующие потери напряжения, представленные в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты расчёта

Параметр	ЛЭП	ГПП	КЛ1	ТП	КЛ2	Сумма
Падение напряжения (режим максимума нагрузки), $\Delta U'$ %	1,74	3,5	0,52	2,41	7,44	15,61
Падение напряжения (режим минимума нагрузки), $\Delta U''$ %	1,35	3,64	0,31	2,21	7,44	14,95
Потери напряжения в точке 1, $\delta U'_{(-)}$ %				3,7		
Потери напряжения в точке 2, $\delta U'_{(-)}$ %					11	

Режиму максимума и минимума нагрузок соответствуют значения, представленные в таблице 2.

Таблица 2 – Параметры расчёта

Параметр	Максимальное значение	Минимальное значение
$U_{\text{ип}}, \text{кВ}$	115	110
$\beta_{T1, T2}$	0,8	0,5
$\cos f_{T1, T2}$	0,94	0,8

Из полученных результатов видно, что самый удалённый электроприёмник не попадает в промежуток $\pm 10\%$, следовательно, нужно предпринять меры по повышению напряжения на его зажимах, которые можно условно разделить на две группы [1]:

- Не требующих установки специальных регулирующих устройств.
- Связанные с установкой регулирующих устройств.

К первой группе относятся:

- рациональное построение систем электроснабжения, например, с оптимальной загрузкой трансформаторов, применением токопроводов и т.п.;
- установка на ГПП трансформаторов, имеющих устройство регулирования под нагрузкой (РПН). В приведенной схеме используется трансформатор ТРДН40000/110, с устройством РПН;

- правильный выбор ответвлений обмоток трансформатора, имеющих устройства ПБВ (переключение без возбуждения), что и применяется в трансформаторах ТМГ32-1600/10.

Ко второй группе относят:

- устройства поперечного и продольной компенсации;
- специальные регуляторы напряжения.

По [1] наиболее эффективным способом регулирования напряжения в цеховых электрических сетях напряжением до 1кВ – изменение коэффициента трансформации цеховых трансформаторов с помощью ПБВ, однако следует уточнить, что рассмотренный метод требует отключения трансформатора от сети, регулирование таким способом осуществляется редко (в лучшем случае 2 раза в год). Рассмотрим этот способ в режиме максимума нагрузок.

Стандартные значения добавок напряжения с шагом 2,5% в цеховых трансформаторах напряжением 6-10кВ с ПБВ приведены в таблице 3.

Таблица 3 – стандартное значение добавок напряжения

Номер добавки	Количество дополнительных витков <i>w, %</i>	Значения добавки напряжения <i>E_T, %</i>
1	5	0
2	2,5	2,5
3	0	5
4	-2,5	7,5
5	-5	10

Выберем регулировочное ответвление по формуле

$$E_T = U_{2ж} + \sum_{i=1}^n \Delta U_{ли} + \sum_{i=1}^m \Delta U_{Ti} - U_{ИП} \quad (1.3)$$

где $U_{2ж}$ -желаемое напряжение на шинах до 1кВ подстанции,%;

$U_{ИП}$ - напряжение на шинах источника питания (ИП), %;

$\Delta U_{ли}$ -потери напряжения в i -ой линии на пути от ИП до рассматриваемой точки.

ΔU_{Ti} -потеря напряжения в трансформаторах до рассматриваемой точки.

n - число линий на пути к наиболее удалённому электроприёмнику;

m - число трансформаторов на пути к наиболее удалённому ЭП.

В нашем случае:

$$E_T = 105 + 1,74 + 3,5 + 0,52 + 2,41 + 7,44 - 104 = 16,61 \%$$

Ближайшее стандартное значение $E_T=10\%$. После выбора стандартной величины определим фактическое значение вторичного напряжения в % :

$$U_2 = U_{ИП} + E_T - \sum_{i=1}^n \Delta U_{ли} - \sum_{i=1}^m \Delta U_{Ti} \quad (1.4)$$

$$U_2 = 105 + 10 - 1,74 - 0,52 - 7,44 - 3,5 - 2,41 = 99,39 \%$$

Найдём напряжение на шинах до 1кВ:

$$U_2 = \frac{99,39 \cdot 400}{100} = 397,56 \text{ В} .$$

Можно сделать вывод, что использование данного метода будет более целесообразно в том случае, если ИП будет ГПП, а не удалённый источник питания (подстанция системы 110/10кВ) с продолжительной питающей линией.

В свою очередь на ГПП на трансформаторе Т1 существует свое регулирование РПН, которое происходит в автоматическом режиме. Необходимо определить новый коэффициент трансформации, т.е. найти ту ступень регулирования, которая сможет обеспечить желаемое напряжение электроприёмника. Трансформатор ТРДН40000/110 имеет диапазон регулирования $-9 \times 1,78 \div +9 \times 1,78$, тогда известно, что

$$K_{\text{тр}}^{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}}} , \tag{1.5}$$

где $U_{\text{ВН}}$ - номинальное напряжение высшей стороны трансформатора;

$U_{\text{НН}}$ - номинальное напряжение низшей стороны.

Определим новый коэффициент трансформации по формуле:

$$K_{\text{тр}}^{\text{НОВ}} = K_{\text{тр}}^{\text{НОМ}} \cdot \left(1 + \frac{m \cdot 1,78}{100}\right) , \tag{1.6}$$

где m - ступени регулирования трансформатора.

Для режима наибольших нагрузок ($\delta U_{(-)}' = 11\%$) можно составить отношение:

$$\frac{U_{\text{ВН}}}{U_{\text{НН}} \cdot K_{\text{тр}}^{\text{НОВ}}} = 1,11; \quad \frac{K_{\text{тр}}^{\text{НОМ}}}{K_{\text{тр}}^{\text{НОВ}}} = 1,11 .$$

Подставив (1.5) и (1.6) получим:

$$\frac{1}{\left(1 + \frac{m \cdot 1,78}{100}\right)} = 1,11 . \tag{1.7}$$

Выразив m из (1.7): $m = -5,67\%$, что соответствует стандартному значению $m = -6\%$. Можно сделать вывод, что при ступени РПН равной $-6 \times 1,78$ мы сможем отрегулировать напряжение низшей стороны трансформатора ТРДН40000/110, на 11%.

Ещё один способ регулирования напряжения на зажимах электроприёмника является использование компенсирующих устройств, которые могут быть подключены, как параллельно, так и последовательно. На практике чаще встречается параллельное подключение (поперечная компенсация).

Рассмотрим влияние мощности компенсирующего устройства на потери напряжения в питающей линии. Падение напряжения находится по выражению [1]:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_{\text{ном}}} \cdot 10^{-3} \quad (1.8)$$

Тогда, величина, на которую снизится падение напряжения, а это в свою очередь приведёт к увеличению напряжения на зажимах АД, при использовании компенсирующего устройства мощностью Q_k вычисляется как:

$$\delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2 \quad (1.9)$$

где ΔU_1 и ΔU_2 - потери напряжения до и после компенсации соответственно.

Тогда с учётом выражения (1.8) получим $\delta U\%$:

$$\delta U\% = \frac{Q_k X}{10U_{\text{ном}}^2} 10^{-3} \quad (1.10)$$

Из выражения (1.10) определим значение мощности компенсирующего устройства:

$$Q_k = \frac{10U_{\text{ном}}^2 \delta U\%}{X} \quad (1.11)$$

При $\delta U\% = 11\%$, $Q_k = 678$ квар.

Заключение

Проблема регулирования напряжения актуальна на сегодняшний день, использование того или иного метода, приведенного выше носит индивидуальный характер и требует более тщательной проработки вопроса, в том числе экономического обоснования.

Литература

1. Радкевич В.Н. Электроснабжение промышленных предприятий: учеб. пособие/ В.Н. Радкевич, В.Б. Козловская, И.В. Колосова. – 2-е изд., исправленное.- Минск: ИВЦ Минфина, 2017. – 589 с.
2. Показатели качества электроэнергии в электрических сетях [Электронный ресурс]/. Показатели качества электроэнергии в электрических сетях. -Режим доступа: <http://electricalschool.info/main/elsnabg/1474-pokazateli-kachestva-jelektroenergii-v.html/>. – Дата доступа: 25.10.2021.
3. ГОСТ32144-2013 [Электронный ресурс]/межгосударственный стандарт. -Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200104301/>. – Дата доступа: 25.10.2021.