

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В СЕЛЬСКИХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЯХ 0,4 кВ С ПОМОЩЬЮ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

В.В. КАРЧИН., В.Т. СИДОРОВА., А.Н. ЛЕУХИН

Марийский государственный университет, г. Йошкар-Ола

В работе приводится методика локального распределения устройств компенсации реактивной мощности в сельских сетях 0,4 кВ, с целью улучшения некоторых основных показателей качества электроэнергии – установившегося отклонения напряжения и коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и по нулевой последовательности. Приводятся расчетные значения уменьшения потерь активной мощности при улучшении перечисленных показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: поперечная компенсация реактивной мощности, коэффициент мощности, показатели качества электроэнергии, потери напряжения, коэффициент несимметрии напряжения, энергосбережение, сельские сети 0,4 кВ.

Введение

В сельской местности РФ электроснабжение осуществляется преимущественно воздушными линиями (ВЛ), имеющими большой процент падения напряжения, связанный с их протяженностью. В настоящее время наблюдается интенсивный рост потребления электроэнергии в жилищном секторе. Это все приводит к тому, что ЛЭП, спроектированные по нормам электропотребления второй половины прошлого века, уже не обладают необходимой пропускной способностью, и качество электроэнергии (КЭ) у ее потребителей все чаще не соответствует ее нормам [1]. При передаче по электрической сети энергии, не соответствующей требованиям к КЭ, растут и ее потери. Встает вопрос об эффективных мерах повышения КЭ в сельских распределительных сетях 0,4 кВ. Считается, что из-за относительно коротких фидеров и небольшой присоединенной мощности компенсация реактивной мощности и фильтрация высших гармоник в сетях 0,4 кВ экономически невыгодны. Однако, в других странах широко используются устройства компенсации и фильтрации высших гармоник в распределительных сетях 0,4 кВ [2].

Одними из основных показателей КЭ для сетей 0,4 кВ являются установившееся отклонение напряжения δU_y и коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} , и коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Положительные и отрицательные отклонения напряжения не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю в точке передачи электрической энергии (см. ГОСТ Р 54149-2010). Передача электроэнергии по ВЛ ниже 110 кВ сопровождается неизбежным падением напряжения $\Delta \underline{U} = \underline{U}_1 - \underline{U}_2$, которое является комплексной величиной, где $\underline{U}_1$ – напряжение в начале линии; $\underline{U}_2$ – напряжение на ее конце. Арифметическую разность $\Delta U = U_1 - U_2$ называют потерей напряжения. Для ВЛ номинальным

© В.В. Карчин, В.Т. Сидорова, А.Н. Леухин

Проблемы энергетики, 2015, № 1-2

напряжением 110 кВ и ниже характерно примерное равенство активного R и индуктивного X сопротивлений линии либо превышение R над X . Поэтому при расчете таких сетей поперечную составляющую (мнимую часть) падения напряжения можно не учитывать, тогда [3]

$$\Delta U = (PR + QX)/U_1. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что уменьшить потери напряжения можно, уменьшив сопротивления линии или реактивную мощность Q . Поскольку уменьшение сопротивления ВЛ является довольно дорогостоящим мероприятием, можно уменьшить реактивную мощность, которая часто не потребляется в сетях низкого напряжения и приводит лишь к потерям напряжения и, как следствие, – потерям активной мощности. Установка конденсаторов с параллельным включением в сеть называется поперечной компенсацией. При этой компенсации конденсаторы, генерируя реактивную мощность, повышают коэффициент мощности и одновременно регулируют напряжение, т. е. уменьшают потери напряжения в сети [4].

Реактивная мощность, кВар, генерируемая конденсаторной батареей (КБ) [4],

$$Q_C = U^2 2\pi f C.$$

При выборе конденсаторов исходят из необходимости повышения напряжения в линии при неизменной величине активной нагрузки, что определяется разностью между потерями напряжения в линии до и после включения конденсаторов:

$$\Delta U = \Delta U_1 - \Delta U_2 = [P_1 r_{\text{Л}} + Q_1 x_L - (P_2 r_{\text{Л}} + Q_2 x_L)] / U_{\text{ном}}^2,$$

где P_1 , P_2 и Q_1 , Q_2 – активная и реактивная мощности; $r_{\text{Л}}$ и x_L – сопротивления сети. Введением дополнительной реактивной мощности Q_C снижается реактивная нагрузка сети ($Q_2 = Q_1 - Q_C$). Так как $P_1 = P_2$, то относительное изменение напряжения регулирования

$$U_{\text{рег}} = Q_C x_L / U_{\text{ном}}^2.$$

В работе [5] предложена локальная поперечная компенсация реактивной мощности (КРМ) в сельских распределительных сетях 0,4 кВ. Авторами работы [5] предлагается методика распределения устройств КРМ с целью обеспечения установившегося отклонения напряжения в пределах допустимого значения у всех потребителей в электрических сетях 0,4 кВ, имеющих средневзвешенный $\cos \varphi = 0,8$ и ниже. Согласно данной методике распределять устройства КРМ предлагается непосредственно на линии электропередач (мачтовым способом), а значение мощности данных устройств не будет превышать 50 кВар. Устанавливать устройства КРМ необходимо начинать с точки присоединения потребителей, ближайшей от ТП, где отклонение напряжения не удовлетворяет предельно допустимому значению. После расчета согласно выражению (1) (или измерения) новых значений отклонения напряжения во всех точках присоединения потребителей, снова устанавливают устройство КРМ в точке, ближайшей от ТП, где отклонение напряжения не удовлетворяет предельно допустимому значению. Распределять устройства КРМ таким образом необходимо до тех пор, пока во всех точках присоединения потребителей отклонение напряжения не будет удовлетворять предельно допустимым значениям. При определении мест установки устройств КРМ также определяется значение их реактивной мощности, которая не должна приводить к перекомпенсации в линии.

Для коэффициентов несимметрии напряжений по обратной и по нулевой последовательности установлены следующие нормы КЭ (ГОСТ Р 54149-2010):

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности

K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2 % в течение 95 % времени интервала в одну неделю;

- значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4 % в течение 100 % времени интервала в одну неделю.

При неравномерной нагрузке фаз линии потери мощности увеличиваются не только в самих фазных проводах, но и за счет протекания тока по нулевому проводу [6]:

$$I_A^2 + I_B^2 + I_C^2 \geq 3I_{\text{ср}}^2,$$

где $I_{\text{ср}}$ – средний ток трех фаз, протекающий по каждой из фаз при равномерной нагрузке.

Увеличение потерь мощности за счет неравномерности нагрузки фаз трёхпроводной линии происходит в N^2 раз, а четырехпроводной линии может быть учтено выражением [7]

$$N^2(1 + 1,5 \frac{R_H}{R_\Phi}) - 1,5 \frac{R_H}{R_\Phi}, \quad (2)$$

где R_H и R_Φ – соответственно сопротивление нулевого и фазного провода; N^2 – квадрат коэффициента неравномерности нагрузки фаз линии, определяемый выражением

$$N^2 = \frac{1}{3} \left[\left(\frac{I_A}{I_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\frac{I_B}{I_{\text{ср}}} \right)^2 + \left(\frac{I_C}{I_{\text{ср}}} \right)^2 \right]. \quad (3)$$

На этапе эксплуатации сети необходимо снижать степень неравномерности нагрузки фаз. При этом выделяют вероятностную несимметрию: с большей загрузкой то одной, то другой фазы и систематическую несимметрию: в течение длительного времени неодинаковы средние значения фазных токов [6].

Улучшение показателей качества электроэнергии

1. Отклонение напряжения

На рис. 1 показаны результаты расчета активной и реактивной мощностей до компенсации и реактивной мощности после компенсации при использовании методики распределения устройств КРМ, описанной в работе [5]. Расчеты проводились с помощью методики суммирования расчетных нагрузок ТП [8]. На рис. 2 приведены результаты расчета потерь напряжения в линии до компенсации и после компенсации.

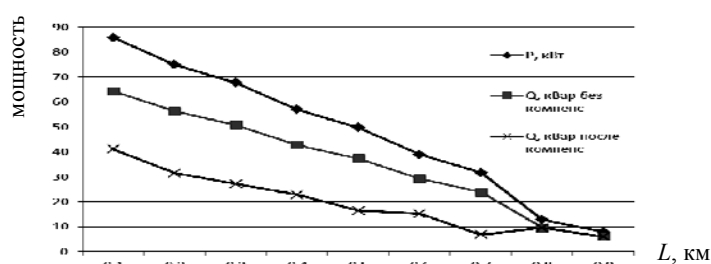


Рис. 1. Зависимость активной и реактивной мощностей от длины линии, устройства КРМ расположены в узлах $L=0,5$ км, $Q_C=20,9$ кВар и $L=0,7$ км, $Q_C=17$ кВар

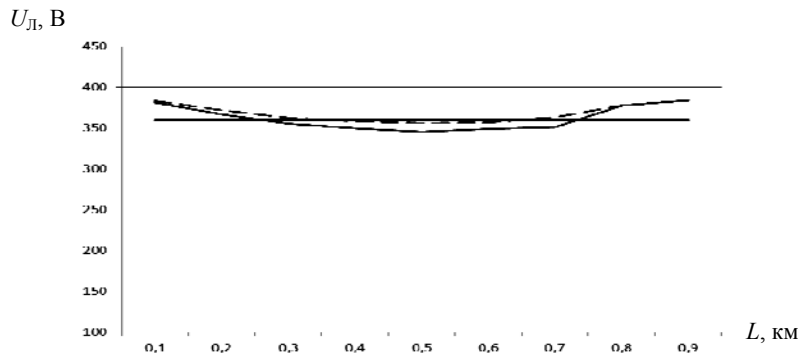


Рис.2. Расчетные значения напряжений в линии в узлах линии через 0,1 км, 400 В – напряжение на выходе ТП, 360 В – предельно допустимое значение (от 400 В), сплошная линия – потери напряжения без компенсации, пунктирная – после компенсации

Из приведённых графиков видно, что при распределении устройств КРМ на линии с помощью предлагаемой методики, потери напряжения могут быть снижены на 3 % от номинального. После установки устройств КРМ установившиеся значения отклонения напряжения от номинального будут находиться в пределах допустимого значения.

2. Симметрирующий эффект при компенсации реактивной мощности

Несимметрия напряжения обусловлена протеканием в системе электроснабжения токов обратной и нулевой последовательности, создаваемых несимметричными нагрузками, когда векторы токов и углы между ними различны. Известно, что такие токи могут быть представлены их симметричными составляющими прямой $\underline{I}_1$, обратной $\underline{I}_2$ и нулевой последовательности $\underline{I}_0$. Задача симметрирования состоит в том, чтобы параллельно нагрузке (на те же шины) поставить устройство, которое компенсировало бы ток обратной и (или) нулевой последовательности. В этом случае ток компенсирующего устройства должен быть равен по значению и противоположен по фазе соответствующему току, создаваемому нагрузкой. При межфазной компенсации и симметрировании ток нулевой последовательности в линейных проводах симметрирующего устройства отсутствует и, следовательно, при такой схеме соединения КБ симметрирующий эффект по нулевой последовательности достигнут быть не может [3]. Рассмотрим симметрирующий эффект при пофазной компенсации реактивной мощности. Несимметричная система токов компенсирующего устройства $\underline{I}_{ak}$, $\underline{I}_{bk}$, $\underline{I}_{ck}$, представленная в форме симметричных составляющих, имеет вид:

$$\begin{aligned}\underline{I}_{1k} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_{ak} + a\underline{I}_{bk} + a^2\underline{I}_{ck}); \\ \underline{I}_{2k} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_{ak} + a^2\underline{I}_{bk} + a\underline{I}_{ck}); \\ \underline{I}_{0k} &= \frac{1}{3}(\underline{I}_{ak} + \underline{I}_{bk} + \underline{I}_{ck});\end{aligned}\tag{4}$$

где

$$\begin{aligned}\underline{I}'_A &= \underline{I}_a + \underline{I}_{ak}; \\ \underline{I}'_B &= \underline{I}_b + \underline{I}_{bk}; \\ \underline{I}'_C &= \underline{I}_c + \underline{I}_{ck}.\end{aligned}\tag{5}$$

Здесь $\underline{I}'_A, \underline{I}'_B, \underline{I}'_C$ – линейные токи после компенсации, $\underline{I}_a, \underline{I}_b, \underline{I}_c$ – линейные токи до компенсации. Учтем, что линейные токи после компенсации должны быть симметричными, т.е. $\underline{I}'_A = I'_A$, $\underline{I}'_B = a^2 \cdot I'_B$, $\underline{I}'_C = a \cdot I'_C$, и $I'_A = \text{Re}(\underline{I}_a)$, $I'_B = \text{Re}(\underline{I}_b)$, $I'_C = \text{Re}(\underline{I}_c)$.

После подстановки (5) в (4) получим:

$$\begin{aligned} \underline{I}_{1k} &= \frac{1}{3} j (I_a \sin \varphi_{iA} + I_b \sin \varphi_{iB} + I_c \sin \varphi_{iC}); \\ \underline{I}_{2k} &= \frac{1}{3} j (I_a \sin \varphi_{iA} + a I_b \sin \varphi_{iB} + a^2 I_c \sin \varphi_{iC}); \\ \underline{I}_{0k} &= \frac{1}{3} j (I_a \sin \varphi_{iA} + a^2 I_b \sin \varphi_{iB} + a I_c \sin \varphi_{iC}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\varphi_{iA} = \varphi_{uA} - \varphi_A$, φ_A – разность фаз между соответствующим фазным напряжением и током. Система (6) описывает симметрирующий эффект конденсаторной батареи. Решение этой системы позволяет сделать вывод, что при такой схеме включения конденсаторных батарей может быть достигнут симметрирующий эффект по нулевой последовательности. Поскольку основной проблемой сельских сетей 0,4 кВ является превышение нормально допустимого значения коэффициента несимметрии напряжения по нулевой последовательности в 2-2,5 раза, с помощью устройств КРМ можно значительно улучшить значение этого коэффициента.

Экономический эффект от КРМ

Определим экономический эффект от локальной КРМ с помощью предложенной методики с учетом симметрирующего эффекта.

Уменьшение напряжения в линии приводит к увеличению потерь активной мощности в линии электропередач и в понижающих трансформаторах.

Потери активной мощности в электрической сети можно определить [8]:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R = \frac{P^2 (1 + \text{tg}^2 \varphi)}{U^2} R = \frac{P^2 R}{U^2} \cdot \frac{1}{\cos^2 \varphi}, \quad (7)$$

где P, Q, U – активная и реактивная мощности, передаваемые по линии, линейное напряжение, R – эквивалентное активное сопротивление линии ($R = rL$, r – удельное активное сопротивление линии, L – длина линии); $\cos \varphi$ – коэффициент мощности; $\text{tg} \varphi$ – коэффициент реактивной мощности в линии. Из выражения (7) следует, что при неизменной передаваемой мощности P и напряжении U в линии потери мощности будут зависеть от коэффициента мощности и длины линии L . Расчет потерь активной мощности в линии проведен для наиболее характерного, средневзвешенного $\cos \varphi = 0,85$ в распределительных электрических сетях 10(6)-0,4 кВ региональных сетевых компаний и $\cos \varphi = 1$ после компенсации. Тогда, согласно (7), потери активной мощности после компенсации уменьшатся на величину:

$$\Delta P - \Delta P_k = \frac{P^2 R}{U^2} \cdot \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi''} \right) = \frac{P^2 R}{U^2} \cdot 0,38.$$

В этом случае потери в линии уменьшатся на $\frac{\Delta P - \Delta P_k}{\Delta P} \cdot 100\% = 27,5\%$.

Потери активной мощности в трансформаторах состоят из двух составляющих: потерь, идущих на нагревание обмоток трансформатора ΔP , зависящих от тока

нагрузки, и потерь, идущих на нагревание стали $\Delta P_{СТ}$, не зависящих от тока нагрузки [8]. Потери мощности, идущие на нагревание обмоток трансформатора,

$$\Delta P = 3I^2 R_T = \frac{S^2}{U^2} R_T = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T.$$

Тогда полные активные потери

$$\Delta P_T = \Delta P + \Delta P_{СТ} = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R_T + \Delta P_{СТ},$$

где R_T – активное сопротивление, Ом, обмоток трансформатора.

Если даны потери короткого замыкания $\Delta P_{М.НОМ}$, соответствующие потерям в меди при номинальной нагрузке трансформатора $S_{НОМ}$, и известна его фактическая загрузка S , то активные потери

$$\Delta P_T = \Delta P_M + \Delta P_{СТ} = \Delta P_{М.НОМ} (S/S_{НОМ})^2 + \Delta P_{СТ}.$$

При компенсации реактивной мощности на стороне 0,4 кВ потери активной мощности уменьшатся и станут равными

$$\Delta P'_T = \Delta P_{М.НОМ} (S'/S_{НОМ})^2 + \Delta P_{СТ},$$

где $S' = \sqrt{P^2 + Q'^2} = P/\cos \varphi'$, $\cos \varphi'$ – коэффициент мощности после компенсации.

Определим, насколько изменятся потери мощности в трансформаторе после компенсации:

$$\Delta P_T - \Delta P'_T = \frac{\Delta P_{М.НОМ} P^2}{S_{НОМ}^2} \left(\frac{1}{\cos^2 \varphi} - \frac{1}{\cos^2 \varphi'} \right).$$

При повышении коэффициента мощности $\cos \varphi$ со значения 0,85 до 0,95 $\frac{\Delta P_T - \Delta P'_T}{\Delta P_T} \cdot 100\% = 20\%$.

Таким образом, при полной загрузке трансформатора потери мощности после компенсации будут на 20 % меньше потерь в меди до компенсации. Примем среднее значение потерь мощности в меди равным 1,5 % [8], тогда потери в трансформаторе за счет КРМ могут быть уменьшены на 0,3 %.

Определим уменьшение потерь активной мощности с учетом эффекта симметрирования при КРМ. Поскольку ток нулевого провода равен утроенному значению тока нулевой последовательности, определим насколько он уменьшится после КРМ согласно выражению (6). Даже при КРМ в одной из фаз линии от значения $\cos \varphi = 0,85$ до $\cos \varphi = 1$ ток нулевого провода уменьшится на 1 %, что приведет к уменьшению потерь активной мощности на 2 % по сравнению с режимом без КРМ.

Тогда для рассматриваемой линии суммарные потери (потери в линии, трансформаторах и потери, обусловленные несимметрией напряжения) будут уменьшены на $27,5\% + 0,3\% + 2\% = 29,8\%$ по сравнению с режимом без КРМ.

Заключение

В работе показано, что при локальной поперечной компенсации реактивной мощности в сельских сетях 0,4 кВ с низким значением коэффициента мощности, могут быть значительно улучшены такие основные показатели КЭ, как установившееся отклонение напряжения и коэффициенты несимметрии по напряжению. Распределяя на линии устройства КРМ с помощью предлагаемой методики, обеспечиваются значения

уровня напряжения и коэффициентов несимметрии по напряжению, соответствующие нормам качества электроэнергии у всех ее потребителей. Потери активной мощности в электрической сети могут быть уменьшены на 30 % от потерь без КРМ.

Предлагаемые решения позволят, в целом, в электрических сетях улучшить эффективность передачи и потребления электроэнергии, увеличить КПД электропередачи и экономичность работы электросетевых предприятий.

Summary

The paper presents the method local distribution of reactive power compensation in rural networks 0,4 kV for improve one's of the main quality indicators electricity - steady voltage deviation and coefficient's of voltage unbalance on the reverse and zero sequence. The calculated values reduce active power losses while improving the quality of electricity listed.

Keywords: *the transverse reactive power compensation, power factor, quality indicators electricity, voltage loss, coefficient of voltage unbalance, energy saving, rural networks 0,4 kV.*

Литература

1. ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Утв. и введен в действие Приказом Росстандарта от 21.12.2010 N 904-ст. URL: http://www.energometrika.ru/product_files/512/GOST_R_54149-2010.pdf.
2. Phase Mod PFC Modules for Low-Voltage Power Factor Correction. Epcos AG. Corporate Communications. Editions 03/2005. Germany.
3. Карташев И.И., Тульский В.Н. и др. Управление качеством электроэнергии: под ред. Шарова Ю.В.М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 354 с.
4. Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий и установок. М.: Высшая школа, 1990. 363 с.
5. Карчин В.В., Сидорова В.Т. Локальная компенсация реактивной мощности в сельских распределительных сетях 0,4 кВ // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014. №11. С. 21-24.
6. Поспелов Г.Е., Сыч Н.Д. Потери мощности и энергии в электрических сетях / под ред. Г.Е. Поспелова. М.: Энергоатомиздат, 1981. 216 с.
7. Потери электроэнергии в электрических сетях энергосистем / В.Э. Воротницкий, Ю.С. Железко, В.Н. Казанцев и др. / под ред. В.Н. Казанцева. М.: Энергоатомиздат, 1983. 368 с.
8. Каганов И.Л. Курсовое и дипломное проектирование. 3-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 351 с.

Поступила в редакцию

23 декабря 2014 г.

Карчин Виктор Васильевич – канд. техн. наук, доцент электроэнергетического факультета Марийского государственного университета (МарГУ), г. Йошкар-Ола. Тел: 8(8362)415470. E-mail: eef@marsu.ru.

Сидорова Вера Тагировна – канд. физ.-мат. наук, доцент электроэнергетического факультета Марийского государственного университета (МарГУ), г. Йошкар-Ола. Тел: 8(917)7152174. E-mail: veranig@yandex.ru.

Леухин Анатолий Николаевич – д-р физ.-мат. наук, проректор по научной работе и инновационной деятельности Марийского государственного университета (МарГУ), г. Йошкар-Ола. Тел: 8(8362)688005. E-mail: naukamarsu@bk.ru.