

УДК 621. 317

Кизилов В.У.<sup>1</sup>, Зубюк Ю.П.<sup>2</sup>, Партола О.В.<sup>3</sup>

### **ПОГРЕШНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМАХ ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ**

*Рассмотрена проблема оптимальной компенсации дополнительных потерь в энергосистеме посредством конденсаторов в условиях несимметрии. Оценен порядок погрешности измерений при используемом сейчас алгоритме компенсации и рассмотрен более эффективный алгоритм компенсации для трехфазных цепей.*

*Постановка проблемы.* Определение погрешностей компенсации некачественности потребителя электроэнергии при наличии несимметрии напряжения и нагрузки.

*Цель статьи.* Определение алгоритма с минимальной погрешностью при несимметрии в питающей сети и нагрузке.

*Анализ последних исследований и публикаций.* При конденсаторной компенсации индуктивности трехфазного потребителя электроэнергии используют батарею из трех конденсаторов одинаковой емкости, величина которой определяется по результатам измерений в одной фазе.

Естественно рассмотреть вопрос погрешности компенсации из-за несимметрии в трехфазной цепи. Будем предполагать напряжения синусоидальными, а нагрузку линейной. Рассмотрим сначала случай, когда нагрузка симметричная (активно-индуктивная), а напряжения несимметричны.

Предполагается, что измеряется реактивная мощность в одной фазе и подключением соответствующего конденсатора сводится к нулю. Если измеряется величина реактивной мощности

$$Q = UI \sin \varphi, \quad (1)$$

где  $U$ ,  $I$  – действующие значения напряжения  $u(t)$  и тока  $i(t)$ , а  $\varphi$  – угол между синусоидами тока и напряжения, то значение емкости компенсирующего конденсатора определится соотношением

$$C = \frac{tg \varphi}{\omega R (1 + tg^2 \varphi)}. \quad (2)$$

Как видно из (2), значение оптимальной компенсирующей емкости не зависит ни от величины, ни от фазы напряжения и, следовательно, при симметричной нагрузке установка одинаковых конденсаторов во всех фазах приведет к правильной полной компенсации реактивности потребителя электроэнергии, если измерения осуществляются по соотношению (1).

Однако, точное измерение реактивной мощности по выражению (1) очень сложно и обычно используют следующее приближенное выражение

$$Q = \frac{1}{\sqrt{3}} \overline{i_A u_{BC}}, \quad (3)$$

где  $i_A$  – мгновенный ток фазы  $A$  и  $u_{BC}$  – мгновенное значение напряжения между фазами  $B$  и  $C$ , а черта сверху означает усреднение на периоде.

Значения реактивной мощности по выражениям (1) и (3) совпадают при симметричной трехфазной системе напряжений. При несимметрии напряжений значение  $Q$  по выражению (3) отличается от значения  $Q$  по выражению (1).

Представляет интерес оценить погрешность измерения в этом случае при несимметрии напряжений.

Удобно воспользоваться методом, разработанным в [1]. Известно, что комплексная мощность  $\dot{S}$  в цепи с индуктивной нагрузкой

$$\dot{S} = \dot{U} \cdot \dot{I}^* = UI \cos \varphi + jUI \sin \varphi = P + jQ, \quad (4)$$

<sup>1</sup>Национальный технический университет "ХПИ", канд. техн. наук, проф.

<sup>2</sup>Институт электродинамики НАН Украины, канд. техн. наук, доц., ст. науч. сотр.

<sup>3</sup>Национальный технический университет "ХПИ", магистр

откуда

$$Q = \text{Im} \dot{S} = \text{Im} \dot{U} \cdot \dot{I}^* = -\text{Re} j \dot{U} \cdot \dot{I}^* \quad (5)$$

При использовании алгоритма (3) и принятом предположении о синусоидальности напряжений

$$Q = -\frac{1}{\sqrt{3}} \text{Re} j \dot{U}_{BC} \cdot \dot{I}_A^* \quad (6)$$

Согласно таблице 2 из [1] произведению комплексов соответствует матрица  $\dot{U}_{BC}$  и  $\dot{I}_A^*$  соответствует матрица  $M_{CC}$  в координатах симметричных составляющих:

$$M_{CC} = \frac{1}{3} \left\{ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ a^2 - a & a^2 - a & a^2 - a \\ a - a^2 & a - a^2 & a - a^2 \end{bmatrix} \right\}, \quad (7)$$

Откуда

$$Q = -\frac{1}{3\sqrt{3}} \text{Re} j \left[ \dot{U}_0, \dot{U}_{1A}, \dot{U}_{2A} \right]^t \cdot \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ -j\sqrt{3} & -j\sqrt{3} & -j\sqrt{3} \\ j\sqrt{3} & j\sqrt{3} & j\sqrt{3} \end{bmatrix} \times \\ \times \begin{bmatrix} \dot{I}_0^* \\ \dot{I}_{1A}^* \\ \dot{I}_{2A}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \left[ Q_{1A} - Q_{2A} + \left( \dot{U}_{1A} \cdot \dot{I}_{2A}^* - \dot{U}_{2A} \cdot \dot{I}_{1A}^* \right) + \left( \dot{U}_{1A} - \dot{U}_{2A} \right) \dot{I}_0^* \right], \quad (8)$$

где индексы 1,2 и 0 при токах  $I$  и напряжениях  $U$  соответствуют прямой, обратной и нулевой последовательностям.

При линейной активно-индуктивной  $R-L$  нагрузке токи  $\dot{I}_{2A}^*$  и  $\dot{I}_{1A}^*$  могут быть выражены через напряжения  $\dot{U}_{2A}$  и  $\dot{U}_{1A}$

$$\dot{I}_{1A}^* = \frac{\dot{U}_{1A}(1 + j \text{tg} \varphi_A)}{R(1 + \text{tg}^2 \varphi_A)}; \\ \dot{I}_{2A}^* = \frac{\dot{U}_{2A}(1 + j \text{tg} \varphi_A)}{R(1 + \text{tg}^2 \varphi_A)}, \quad (9)$$

где  $\text{tg} \varphi = \omega L / R$ .

Из (8) и (9) следует, что в этом случае

$$\dot{U}_{1A} \cdot \dot{I}_{2A}^* - \dot{U}_{2A} \cdot \dot{I}_{1A}^* = 0, \quad (10)$$

а погрешность измерения реактивной мощности будет определяться соотношением

$$\Delta Q = \frac{1}{3} \left[ -2Q_2 - Q_0 + \left( \dot{U}_{1A} - \dot{U}_{2A} \right) \dot{I}_0^* \right]. \quad (11)$$

В соответствии с ГОСТ 13109-97 значение напряжения обратной последовательности  $\dot{U}_2$  не должно превышать 4 %. В линейной системе это же ограничение распространяется и на ток  $\dot{I}_2$  обратной последовательности, и следовательно  $2Q_2 \leq 0,32 \%$ , аналогично  $Q_0 \leq 0,16 \%$ .

Такие величины погрешности имеют значение в точных реактивных счетчиках, а в конденсаторных компенсаторах реактивной мощности они значительно меньше погрешности, определяемой дискретностью емкости конденсаторной батареи.

В трехпроводной трехфазной системе  $\dot{I}_0 = 0$  и  $Q_{03} = 0$ , а погрешность мала:  $\Delta Q_3 \approx -\frac{2}{3} Q_{23}$ . В четырехпроводной системе она составляет:  $\Delta Q_4 \approx \dot{U}_{1A} \dot{I}_0^*$  и может достигать 4 % в соответствии с ГОСТ 13109-97.

В случае симметричной нелинейной нагрузки ток обратной последовательности и погрешность могут значительно превышать 4 %.

В этом случае возможно определение компенсирующей емкости по выражению

$$C = -\frac{\overline{i'u'}}{(u')^2}. \quad (12)$$

Это значение емкости в однофазной цепи обеспечивает минимум потерь в сети, который может быть достигнут посредством конденсаторной компенсации при произвольной форме тока и напряжения [2].

Рассмотрим теперь случай, когда напряжение симметрично, а нагрузка несимметрична.

В случае несимметричной нагрузки при симметричном напряжении легко определить максимальные погрешности при определении емкости конденсаторов по измерениям в одной фазе в соответствии с алгоритмом (1). Если измерения в фазе, например  $A$ , определяют некоторое значение емкости компенсирующего конденсатора, а в двух других фазах – чисто активная нагрузка, то в этих фазах будут включены такие же конденсаторы, которые приведут к перекомпенсации в этих фазах, а их емкость и будет погрешностью компенсации в этих фазах. Если же, наоборот, в фазе  $A$  будет чисто активная нагрузка, то не требуется компенсирующая емкость в этой фазе и в двух других фазах компенсирующая емкость не будет включена. Емкость, компенсирующая индуктивность нагрузки в этих фазах, и будет погрешностью такой компенсации. Совершенно аналогичная ситуация будет иметь место и при использовании алгоритма (3).

В [3] показано, что в случае несинусоидальности напряжения 0,4 кВ и линейной индуктивной нагрузки погрешность определения емкости при наличии третьей высшей гармонической составляющей не превышает 1,5 %, для пятой – не превышает 6,7 %, для седьмой – может достигать 9 %. Причем для напряжения выше 1 кВ эта погрешность существенно уменьшается. Например, для напряжения выше 110 кВ погрешность не превышает 1,1 %.

Предлагается новый алгоритм выбора емкости конденсаторов компенсации, который обеспечивает минимум потерь в питающей сети при включении конденсаторов одинаковой емкости в трех фазах.

Потери в питающей сети  $\Delta P$  при несимметричных токах и одинаковых конденсаторах на единицу сопротивления сети определяются выражением

$$\Delta P = (i_{CA} + i_A)^2 + (i_{CB} + i_B)^2 + (i_{CC} + i_C)^2, \quad (13)$$

где  $i_{CA}$ ,  $i_{CB}$ ,  $i_{CC}$  – токи в конденсаторах компенсации, подключенных параллельно нагрузкам фаз (рис. 1);

$i_A$ ,  $i_B$ ,  $i_C$  – токи в фазах  $A$ ,  $B$ ,  $C$  до компенсации.

Из (13), учитывая зависимость тока в конденсаторе от напряжения, получим

$$\Delta P = (Cu'_{A0} + i_A)^2 + (Cu'_{B0} + i_B)^2 + (Cu'_{C0} + i_C)^2, \quad (14)$$

где  $u_{A0} = u_A - u_0$ ;  $u_{B0} = u_B - u_0$ ;  $u_{C0} = u_C - u_0$ .

После возведения в квадрат, дифференцирования по  $C$  и приравнивания производной к нулю получим значение оптимальной емкости  $C_{opt}$ , обеспечивающей минимум потерь в питающей сети

$$C_{opt} = -\frac{\overline{i_A u'_{A0}} + \overline{i_B u'_{B0}} + \overline{i_C u'_{C0}}}{(u'_{A0})^2 + (u'_{B0})^2 + (u'_{C0})^2}. \quad (15)$$

Как видно из (13) – (15), значение оптимальной емкости  $C_{opt}$  не зависит от потенциала нейтрали нагрузки  $U_N$ . В системе с заземленной нейтралью  $U_N = 0$ .

Для вычисления  $C_{opt}$  необходимо сформировать напряжения  $u_{A0}$ ,  $u_{B0}$ ,  $u_{C0}$ , которые недоступны из-за изолированности нуля трехфазной конденсаторной батареи, но могут быть сформированы посредством операционных усилителей, подключенных через одинаковые резисторы к фазам напряжения, как показано на рис. 1.

Если подключить во все фазы  $C_{opt}$ , то в рассмотренных выше критических случаях погрешность будет значительно меньше. Так, если в двух фазах ( $B$  и  $C$ ) нагрузка активная, то компенсирующая емкость равна нулю

$$\overline{i_B u'_{B0}} = 0; \quad \overline{i_C u'_{C0}} = 0 \quad (16)$$

и оптимальная емкость при симметричных напряжениях определится как

$$C_{opt} = -\frac{\overline{i_A u'_{A0}}}{3(u'_{A0})^2}, \quad (17)$$

и будет в три раза меньше перекомпенсация в фазах *B* и *C* и на 2/3 недокомпенсация в фазе *A*.

Если же в фазе *A* будет чисто активная нагрузка  $i_A u'_{A0} = 0$ , то

$$C_{opt} = -\frac{i_B u'_{B0} + i_C u'_{C0}}{3(u'_{A0})^2} \quad (18)$$

и в фазе *A* будет перекомпенсация  $C_{opt}$ , а в фазах *B* и *C* при одинаковых в них нагрузках будет недокомпенсация на 1/3 оптимальной компенсации.

В общем случае погрешность  $\Delta C$  в значении компенсирующей емкости по выражению (12) в фазах *A*, *B*, *C* определится выражением

$$\Delta C_{A,B,C} = \frac{i_{A,B,C} u'_{A0,B0,C0}}{(u'_{A0,B0,C0})^2} - C_{opt} \quad (19)$$

Выбор значения компенсирующей емкости  $C_{opt}$  (12) удобен и тем, что определяет оптимальную компенсацию как при искаженных токах и напряжениях, так и при несимметрии напряжений и нагрузки в трехфазной цепи. Кажущаяся сложность выражения (15) для определения емкости  $C_{opt}$  не существенна в современных микропроцессорных устройствах, так как используются мгновенные значения токов и напряжений.

В этом смысле определение реактивной мощности по выражению (1) значительно сложнее, так как требует определения напряжения и тока основной гармоники и синуса угла сдвига их фаз.

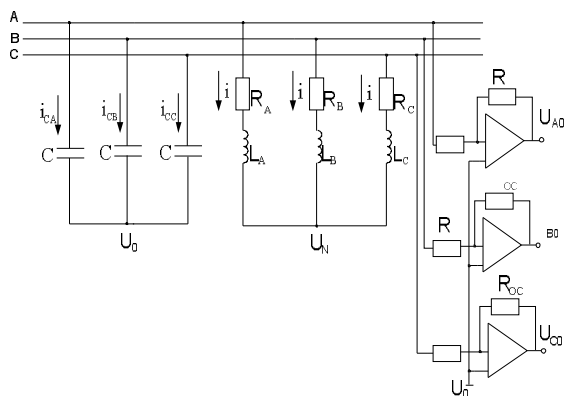


Рис. 1 – Формирование напряжений  $u_{A0}$ ,  $u_{B0}$ ,  $u_{C0}$  посредством операционных усилителей

В современных конденсаторных установках разработчики стремятся устанавливать трехфазные конденсаторы, поскольку стоимость 1 квара при этом существенно меньше, чем при использовании однофазных конденсаторов. Это, в частности, объясняется тем, что стоимость современных импортных трехфазных конденсаторов, по нашим данным, для напряжения 6 – 11 кВ на 15 – 130 %, а для напряжения 0,4 – 0,69 кВ на 25 – 175 % меньше по сравнению с тремя однофазными конденсаторами. Причем эта разница тем больше, чем меньше мощность трехфазного конденсатора.

### Выводы

Рассмотренный алгоритм (15) повышает эффективность конденсаторной компенсации в условиях несимметрии и при наличии искажений в токе и напряжении.

### Перечень ссылок

1. Кизилев В.У. Анализ и синтез методов измерения активной и реактивной мощности / В.У. Кизилев // Наука і освіта: Збірник наукових праць НТУ «ХПІ» та Мішкольцького університету. – Харків: НТУ «ХПІ», 2004. – С. 123 – 130.
2. Кизилев В.У. Современная теория конденсаторной компенсации индуктивного характера потребителя электроэнергии / В.У. Кизилев, Ю.П. Зубюк, О.В. Партола // Электрические сети и системы. – 2007. – № 1. – С. 15 – 20.
3. Кизилев В.У. Визначення ємності компенсуючої конденсаторної батареї / В.У. Кизилев, Ю.П. Зубюк, О.В. Партола // Вісник Харківського національного технічного університету сільськ. госп-ва ім. П.Василенка. – Харків: ХНТУ СГ, 2007. – Вип. 57 «Проблеми енергозабезпечення та енергозбереження в АПК України». – Том 1 - С. 49 – 55.

Рецензент: Ю.В. Владимиров  
канд. техн. наук, проф., НТУ «ХПИ»

Статья поступила 11.03.2008

