

УДК 621.3.11.1.016

Ф.П. ГОВОРОВ¹ (д-р техн. наук, проф.), **В.Ф. ГОВОРОВ**¹, **А.И. ГАНУС**² (канд. техн. наук)¹ Харьковская национальная академия городского хозяйства² Акционерная компания «Харьковоблэнерго»

govorov_fp@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМАМИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С УЧЕТОМ НЕЛИНЕЙНОСТИ ОСВЕТИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРОПРИЕМНИКОВ

Решена задача автоматического управления режимами реактивной мощности в осветительных сетях с учетом искажения кривых токов и напряжений. Предложены методы и технические средства, обеспечивающие решение задачи

Реактивная мощность, осветительные сети, кривые тока, кривые напряжения.

Введение. Известно [1], что основным потребителем осветительных электрических сетей являются разрядные источники света. Исследования, проведенные авторами [1,2] свидетельствуют о том, что эффективность использованной электроэнергии в них находится на довольно низком уровне. Это связано со значительным расходом электроэнергии на технологические нужды и потерями мощности в сетях. Если первая из составляющих эффективности достаточно подробно исследована в известной литературе [3-5], то вопросы, связанные с потерями мощности в осветительных электрических сетях, а также методах и технических средствах их уменьшения, изучены еще в не достаточной мере. При этом, важным фактором, определяющим значение потерь мощности в сетях является уровень автоматизации управления реактивной мощностью. Следует отметить, что применение электромагнитных ПРА в сочетании со значительной реактивностью и неучетом нелинейности характеристик самих разрядных ламп приводит к тому, что значение $\cos\varphi$ в осветительных электрических сетях находится в большинстве случаев на уровне 0,6–0,8, вызывая значительной величины потери напряжения и мощности в сетях и, как следствие, значительный расход и потери электроэнергии в осветительных электроустановках.

Состояние вопроса. Постановка задач исследования.

Как показано [6,12] разрядные лампы являются нелинейными элементами и потребляют значительное количество реактивной мощности. В общем виде, в сетях с такими элементами имеет место протекание реактивных мощностей сдвига и искажения [7,8]. Поскольку, каждая из составляющих реактивной мощности имеет особенности возникновения и характера протекания, соответственно и различными являются способы их компенсации. Поэтому, определенный интерес представляет исследование процессов в разрядных лампах с целью выявления распределения мощностей в лампах и разработки мероприятий по повышению эффективности работы осветительных электрических сетей на их основе.

Исследованию энергетических процессов в разрядных лампах посвящен ряд работ [9-11]. В [9] на уровне физических процессов в лампах дано описание особенностей возникновения и характера протекания реактивной мощности в осветительных электрических сетях с разрядными лампами. В [10,11] обоснована необходимость одновременного учета реактивной мощности сдвига и искажения в них. В то же время комплексного исследования процессов в разрядных лампах с учетом наличия реактивной мощности сдвига и искажения, причинно-следственных связей их возникновения и характера протекания методов и технических средств компенсации не производилось, чем обуславливается наличие значительных потерь мощности и энергии в сетях, а также низкое качество электроэнергии в них. По этой причине исследование указанных причин представляет научный и практический интерес.

Исследование процессов в разрядных лампах.

Исследования физических процессов в разрядных лампах, проведенные в [9], свидетельствуют о наличии в разрядных лампах нового типа реактивной мощности, которая связана с инерционностью носителей зарядов. Указанная составляющая реактивной мощности может связываться скорее всего с реактивной мощностью сдвига. В тоже время многочисленные расчеты численного значения реактивной мощности в сетях с разрядными лампами свидетельствуют о наличии дополнительной, неучтенной энергии. Последнее может быть объяснено наличием другого типа реактивной мощности – мощности искажения.

Для описания процессов в цепях с разрядными лампами в этих условиях может быть использовано соотношение [7]:

$$S^2 = P^2 + Q_c^2 + T^2 + Q_m^2, \quad (1)$$

где $P = \frac{1}{T} \int P dt = \frac{1}{T} \int u i dt$ – активная мощность цепи; Q_c, T, Q_m – мощности сдвига, искажения и несимметрии, соответственно.

© Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Ганус А.И., 2011

В случае единичного электроприемника $Q_{ис} = 0$ и задача исследования сводится к выявлению в разрядных лампах величины, характера и соотношения между реактивными мощностями сдвига $Q_{лс}$ и искажения $T_{л}$.

Реактивная мощность сдвига разрядных ламп $Q_{лс}$ может быть описана выражением:

$$Q_c = U_{л} I_{л} \sin \phi_{л} . \quad (2)$$

Реактивная мощность искажения $T_{л}$ может быть записана в виде:

$$T_{л} = \sum_v Q_{лv} = \sum_v U_{лv} I_{лv} \sin(\phi_{lv} - \phi_{iv}) . \quad (3)$$

Мощность сдвига $Q_{лс}$ может быть определена по мощности разрядной лампы $P_{л}$, напряжению $U_{л}$ и току $I_{л}$ на лампе, как

$$Q_c = \sqrt{S_{л}^2 - P_{л}^2} = \sqrt{U_{л}^2 I_{л}^2 - P_{л}^2} . \quad (4)$$

Значение реактивной мощности искажения $T_{л}$ определяется на основе разложения напряжения $U_{л}$ и тока лампы $I_{л}$ в гармонический ряд Фурье. Поскольку реактивную мощность лампы характеризует скорость обмена электромагнитной энергией между источником и нагрузкой, в соответствии с [5] в условиях нелинейности параметров полную реактивную мощность лампы $Q_{л}$ по которой ведется компенсация реактивной мощности составляют мощность искажения $T_{л}$ и мощность сдвига $Q_{лс}$, находящиеся в квадратуре, поэтому

$$Q_{л} = \sqrt{Q_c^2 + T_{л}^2} .$$

Векторная диаграмма соответствующая рассмотренным основным представлениям, приведена на рис.1.

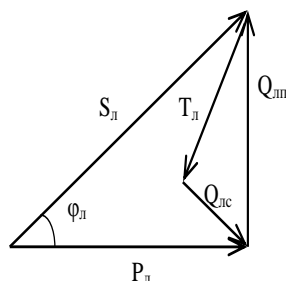


Рисунок 1 - Векторная диаграмма мощностей разрядной лампы

В случае замены негармонических кривых тока и напряжения эквивалентными синусоидами условный коэффициент мощности

$$\cos \phi_{лус} = \frac{P_{л}}{S_{л}}$$

Соответственно, фазовый сдвиг мощностей

$$\varphi_{лус} = \arccos \frac{P_{л}}{S_{л}}$$

При переходе к эквивалентным синусоидам эквивалентная реактивная мощность

$$Q_{л.эkv.} = S_{л} \sin \varphi_{лус}$$

Для характеристики удельного значения мощностей $T_{л}$ и $Q_{лс}$ в мощности $Q_{л}$ использованы выражения

$$K_{T_{л}} = \frac{T_{л}^2}{Q_{л.эkv.}^2} \quad \text{и} \quad K_{Q_{лс}} = \frac{Q_{лс}^2}{Q_{л.эkv.}^2}$$

Расчетом (15) – (21) на примере ламп ДНаТ - 250 получено $Q_c = 75,7392 \text{ Вар}$, $T_{л} = 125,1267 \text{ Вар}$, $Q_{л} = 145,23 \text{ Вар}$, $\cos \varphi_{лус} = 0,8125$, $\varphi_{лус} = 35,66$, $Q_{л.эkv.} = S \sin \varphi_{л} = 146,2616$.

Для рассмотренных условий значения $K_{T_{л}}$ и $K_{Q_{лс}}$ составляют 0,7319 и 0,2682 о.е. или 73% и 26%, соответственно, что говорит в пользу необходимости учета мощности искажения $T_{л}$ при решении вопросов компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях с разрядными лампами.

Автоматизация управления режимами напряжения и реактивной мощности с учетом нелинейности осветительных электроприемников. Анализ параметров и режимов осветительных электрических сетей, проведенный авторами, указал на наличие в них ряда особенностей определяющих условия компенсации реактивной мощности в них. Важнейшими из них являются слабая корреляция графиков нагрузки и реактивной мощности (рис.2), а также протекание в них мощности искажения.

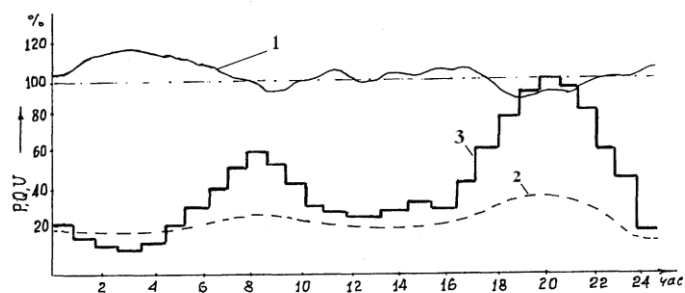


Рисунок 2 - Графики изменения напряжения (U), активной (P) и реактивной (Q) мощностей на шинах низшего напряжения ТП: 1- $U(t)$; 2- $Q(t)$; 3- $P(t)$.

Наличие указанных особенностей ограничивает возможность применения традиционных методов комплексного решения вопросов регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности в сетях с помощью батарей статических конденсаторов (БСК) и делает необходимым применение специальных методов, обеспечивающих решение задачи компенсации в условиях слабой корреляции графиков нагрузки и реактивной мощности, а также наличия искажений кривых тока и напряжения.

Проведенные в ХНАГХ исследования, свидетельствуют о целесообразности применения в таких случаях фазопереключаемых вольтодобавочных трансформаторов (рис.3). Использование в них достоинств магнитной и полупроводниковой техники в сочетании с подключением вторичных обмоток к различным фазам питающей сети позволяет достаточно простым и эффективным способом решать вопросы автоматического регулирования напряжения и компенсации реактивной мощности. Более того, возможность создания большого числа комбинаций модуля и фазы добавочной ЭДС открывают возможность для развязанного управления режимами напряжения и реактивной мощности а применение дополнительных фильтрокомпенсирующих устройств – возможность компенсации высших гармонических составляющих напряжения и тока. Следствием такого подхода является возможность управления параметрами режима осветительных электрических сетей в условиях слабой корреляции графиков напряжения и реактивной мощности а также нелинейности параметров осветительных электроприемников.

Такое устройство содержит вольтодобавочный трансформатор ВДТ 1, в котором вторичная обмотка 2 соединена с входным и выходным зажимами, а первичная обмотка 3 соединена согласно с первичной. Причем вывод первичной обмотки 3, являющийся ее концом, подключен к выводу вторичной обмотки 2, связанному с входным выводом. Свободные концы первичной обмотки 3 через тиристорные ключи на встречно-параллельно соединенных тиристорах 7-16 соединены с одной из фаз сети. К свободным концам первичных обмоток, связанных с тиристорными ключами на тиристорах 7-16, подключен тиристорный ключ на встречно-параллельно соединенных тиристорах 24 и 25. Управляющие электроды всех тиристоров соединены с блоком управления 27.

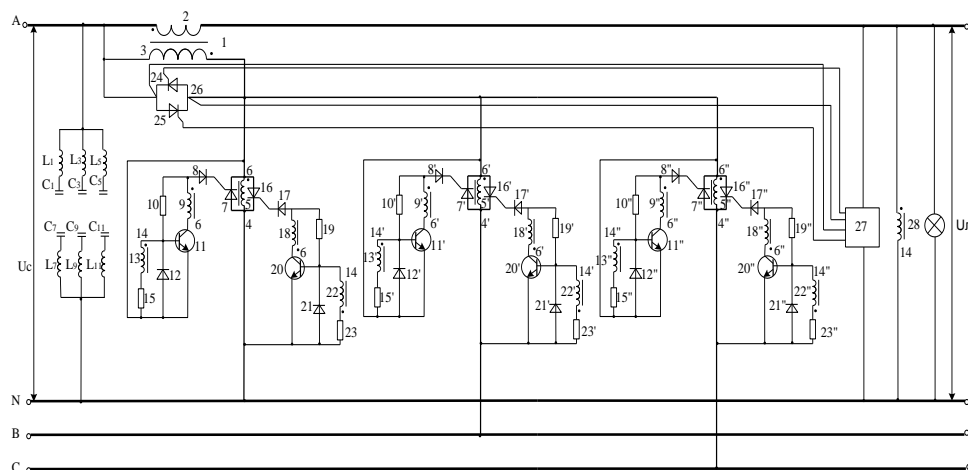


Рисунок 3 - Принципиальная схема многофункционального устройства на базе ВДТ

Устройство работает следующим образом. Если напряжение сети U_c (рис.4) больше номинального входного напряжения $U_c > U_{c\text{ном}}$, то в начальной части каждого полупериода входного напряжения включаются тиристоры 7 и 16.

Их включение обеспечивает подключение обмотки 3 к источнику питания (фазное напряжение U_B либо линейное U_{AB}), обеспечивающему создание требуемого модуля и фазы дополнительного ЭДС E_B либо

E_{AB} . При этом обмотка 2, включенная встречно с напряжением сети, обеспечивает вольтовычет. Напряжение на лампах U_L при этом меньше напряжения сети U_C (рис.4), а фаза тока сети I_C φ_C уменьшается до величины φ_{VI}, φ_V либо φ_{IV} , в зависимости от группы тиристоров, которая включается (7,16, 7',16' либо 7'',16'')

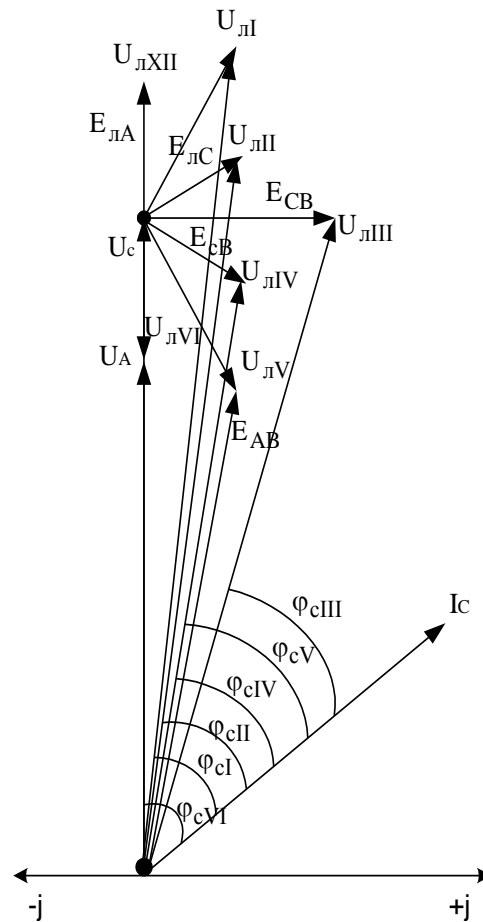


Рисунок 4 – Реализация функции компенсации реактивной мощности на основе фазопереключающего вольтодобавочного трансформатора

Если напряжение сети U_C меньше его максимального значения $U_C < U_{C \max}$, с временным сдвигом, определяемым величиной отклонения выходного напряжения U_L от номинального $U_{ном}$, от блока управления 27 включаются тиристоры 24 и 25. При открытии тиристоров 24 и 25 тиристоры 7 и 16 (7', 16' либо 7'', 16'') закрываются. В этом случае первичная обмотка 3 и последовательно с ней включенная вторичная обмотка 2 закоротены тиристорами 24 и 25, а напряжение на лампах U_L равно напряжению сети $U_L = U_C$.

Если напряжение сети меньше номинального $U_C < U_{C \text{ ном}}$, то в течение каждого полупериода входного напряжения включаются тиристоры 24 и 25, обеспечивая режим «закоротки» обмотки 3. Напряжение на выходе устройства при этом практически равно напряжению сети $U_L = U_C$.

Если напряжение сети больше номинального $U_C > U_{C \text{ ном}}$, с временным сдвигом от блока управления 27 снова включаются тиристоры 7, 16 с 7', 16' либо 7'', 16'' и т.д. трансформаторы 5 и 14 в схеме играют роль синхронизирующих, диоды Д8 и Д12 и сопротивления 19 и 23 – роль ограничивающих.

Таким образом, напряжение на выходе устройства поддерживается на уровне номинального. При этом, подключением тиристоров 7 и 16 либо 7' и 16' или 7'', 16'' обеспечивается изменение фазы добавочной ЭДС ВДТ E_2 , чем открывается возможность для управления потоками реактивной мощности в сетях.

Условиям развязанного управления режимами напряжения и реактивной мощности в осветительных электрических сетях городов соответствуют схемы соединения обмоток ВДТ по группам VI-IX. Этому соответствует уменьшенный сдвиг результирующего вектора напряжения U_L по отношению к вектору тока I_C (рис.4) и добавка либо вычитание напряжения по модулю, в зависимости от времени суток.

Для уменьшения влияния мощности искажения T в схеме предусматривается установка высокочастотных L-C фильтров, настроенных на 3, 5, 7, 9, 11 гармоники. Как показывают расчеты, гармоники более высших порядков существенного влияния на значение T не оказывают.

Экспериментальные исследования работы таких устройств в осветительных электрических сетях городов подтвердили справедливость основных теоретических выводов и возможность снижения потерь мощности в осветительных электрических сетях за счет комплексного развязанного автоматического управления режимами напряжений и составляющими реактивной мощности.

Выводы.

1. Результаты проведенных исследований позволяют утверждать о наличии в осветительных электрических сетях двух составляющих реактивной мощности – реактивной мощности сдвига Q_c и реактивной мощности искажения T .

2. Расчеты выполненные по результатам экспериментальных исследований свидетельствуют о соизмеримости значения реактивной мощности искажения T со значением мощности сдвига Q_c , что требует применения специальных методов и технических средств компенсации.

3. Рассмотренные в работе технические средства автоматической компенсации реактивной мощности на базе фазопереключаемого вольтодобавочного трансформатора в состоянии обеспечить комплексное решение вопросов регулирования напряжения и раздельной автоматической компенсации реактивной мощности сдвига Q_c и искажения T .

ЛИТЕРАТУРА

1. Говоров П.П. Украинская светотехническая отрасль – современное состояние и перспективы // Світло Люкс, 2007, №6, с.76-80.
2. Говоров П.П., Пилипчук Р.В., Токмань А.І., Щиренко В.В., Яремчук Р.Ю. Освітлення промислових об'єктів. – Тернопіль: Джура, 2008. – 388 с.
3. Кузнецов В.Г., Куренный Э.Г., Лютый А.П. Электромагнитная совместимость. Несимметрия и несунсоидальность напряжения. – Донецк: Норд-Пресс, 2005.–250 с.
4. Жежеленко И.В., Саенко Ю.Л. Вопросы качества электроэнергии в электроустановках. – Мариуполь: ПГТУ, 1996. – 173 с.
5. Козлов В.А. Электроснабжение городов / В.А. Козлов – Л.: Энергоатомиздат, 1998. – 264 с.
6. Говоров Ф.П., Говоров В.Ф., Четверикова И.М., Терешин В.Н., Денисенко В.И. К вопросу о реактивной мощности в осветительных установках с разрядными лампами // Технічна електродинаміка.-К.: Інститут електродинаміки НАН України. 2008. – Тематичний випуск: Проблеми сучасної електротехніки, Ч.5. – С.13-17.
7. Fryze S. Active, Reactive and Apparent Power in Non-Sinusoidal Systems, Przegląd Elektrotek. Polska – 1931.- № 7.- P. 193-203.
8. Сегеда М.С. Электричні мережі та системи: Підручник.-Львів: Видавництво НУ «Львівська політехніка», 2007. – 488 с.
9. Говоров Ф.П. К вопросу о компенсации реактивной мощности в осветительных электрических сетях с разрядными лампами / Ф.П. Говоров, В.Ф. Говоров, В.А. Перепеченый, О.В. Терешин // Світло Люкс – 2009.– №6.– С. 60-64.
10. Солончак О.В., Проблеми розрахунку та компенсації реактивної потужності в мережах з несинусоїдним (нелінійним) навантаженням / О.В. Солончак, І.В. Гладь // Енергетика та електрифікація – 2008.– № 6.– С.27-32.
11. Говоров П.П. Керування режимами розподільних електричних мереж міст на основі гнучких систем: дис. ... докт. техн. наук: 05.14.02. – Львів, 2001. – 386 с.
12. Рохлин Р.Н. Разрядные источники света. - М.: Энергоатомиздат, 1991.- 463 с.

Надійшла до редколегії 13.03.2011

Рецензент: І.П.Заболотний

П.П. ГОВОРОВ¹, В.П. ГОВОРОВ¹, О.І. ГАНУС²

¹ Харківська національна академія міського господарства

² Акціонерна компанія «Харківобленерго»

P. GOVOROV¹, V. GOVOROV¹, A. GANUS²

¹ Kharkov National Academy of Municipal Economy

² Joint-stock company «Kharkovoblenergo»

Автоматизоване керування режимами освітлювальних електричних мереж з урахуванням нелінійності освітлювальних електроприймачів. Вирішена задача автоматичного керування режимами реактивної потужності в освітлювальних мережах з урахуванням спотворення кривих току та напруги. Запропоновані методи та технічні засоби, що забезпечують вирішення задачі.
Реактивна потужність, освітлювальні мережі, криві току, криві напруги.

Automatic Control by the Modes of Lighting Electrical Networks with Accounting Nonlinearity of Electrical Lighting Consumers. The complex decision of task of adjustment of tension and compensation a reactive-power is considered in lighting electrical networks taking into account a change and distortion of the crooked currents and voltage. The aggregate of methods and hardware is offered providing the decision of the consider task.
Reactive power, lighting networks, current curve, voltage curve.