

УДК 621.314

*В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, А. Д. МАШИН, М. С. СТЕПАНЧУК***РЕЖИМ ПОЛНОЙ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ С УЧЕТОМ СВОЙСТВ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ**

В статье рассматривается проблема исследования режимов компенсации реактивной мощности в системе электроснабжения, питаемой от синхронного генератора с заданными параметрами. При этом осуществляется анализ системы, в которой реактивная составляющая сопротивления генератора задана необоснованно большим значением, значительно превышающим те величины, которые используются на практике, а расчеты такой системы электроснабжения осуществляются без системного анализа. Показано, что такой подход к рассматриваемой проблеме приводит к некорректным результатам по оценке, как исходного режима, так и режима компенсации реактивной мощности. В результате проведения расчета режима компенсации методом поисковой оптимизации выявляется, что реактивная мощность при некорректно заданном комплексном сопротивлении генератора оказывается не полностью скомпенсированной и коэффициент мощности оказывается меньшим, чем задекларированный в рассматриваемом примере коэффициент, равный единице. Продемонстрирована возможность применения метода поисковой оптимизации для поиска уточненных параметров системы электроснабжения, которые обеспечивают заданные уровни потребления активной мощности нагрузкой и отдачи заданного уровня активной мощности синхронным генератором. В основу таких расчетов положено уравнение равновесия и два ограничения, задающие уровни активных мощностей, отдаваемой генератором и потребляемой нагрузкой, решение которого выполнено в программе MathCAD с помощью парой операторов given-find, реализующими поисковую оптимизацию. В программе MATLAB с использованием поисковой оптимизации, применяемой к визуальной модели, рассчитана величина емкости косинусного конденсатора, при которой достигается полная компенсация реактивной мощности в системе. Рассчитанные таким методом параметры системы электроснабжения обеспечивают снижение активных потерь в линии электропередачи на 20%, чем при режиме частичной компенсации реактивной мощности.

Ключевые слова: синхронный генератор, линия электропередачи, активная мощность, поисковая оптимизация, режим полной компенсации реактивной мощности

*В. Г. ЯГУП, Е. В. ЯГУП, О. Д. МАШИН, М. С. СТЕПАНЧУК***РЕЖИМ ПОВНОГО КОМПЕНСАЦІЇ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ СИСТЕМІ З УРАХУВАННЯМ ВЛАСТИВОСТЕЙ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ**

У статті розглядається проблема дослідження режимів компенсації реактивної потужності в системі електропостачання, що живиться від синхронного генератора з заданими параметрами. При цьому, здійснюється аналіз системи, в якій реактивна складова опору генератора задана необґрунтовано великим значенням, що значно перевищує ті величини, які використовуються на практиці, а розрахунки такої системи електропостачання здійснюються без системного аналізу. Показано, що такий підхід до даної проблеми призводить до некоректних результатів за оцінкою, як вихідного режиму, так і режиму компенсації реактивної потужності. В результаті проведення розрахунку режиму компенсації методом пошукової оптимізації виявляється, що реактивна потужність при некоректно заданому комплексному опорі генератора виявляється не повністю скомпенсувати і коефіцієнт потужності виявляється меншим, ніж задекларований в розглянутому прикладі коефіцієнт, що дорівнює одиниці. Продемонстровано можливість застосування методу пошукової оптимізації для пошуку уточнених параметрів системи електропостачання, які забезпечують задані рівні споживання активної потужності навантаженням і віддачі заданого рівня активної потужності синхронним генератором. В основу таких розрахунків покладено рівняння рівноваги і два обмеження, які визначають рівні активних потужностей, що віддається генератором і споживаної навантаженням, рішення якого виконано в програмі MathCAD за допомогою парою операторів given-find, що реалізують пошукову оптимізацію. У програмі MATLAB з використанням пошукової оптимізації, яка застосовується до візуальної моделі, розрахована величина ємності косинусного конденсатора, при якій досягається повна компенсація реактивної потужності в системі. Розраховані таким методом параметри системи електропостачання забезпечують зниження активних втрат в лінії електропередачі на 20%, ніж при режимі часткової компенсації реактивної потужності.

Ключові слова: синхронний генератор, лінія електропередачі, активна потужність, пошукова оптимізація, режим повної компенсації реактивної потужності

*V. G. YAGUP, E. V. YAGUP, O. D. MASHIN, M.S. STEPANCHUK***MODE OF COMPLETE COMPENSATION OF REACTIVE POWER IN ELECTRICAL SYSTEM TAKING INTO ACCOUNT THE PROPERTIES OF THE ELECTRIC TRANSFER LINE**

The article discusses the problem of studying the modes of reactive power compensation in the power supply system, powered by a synchronous generator with specified parameters. At the same time, the system is analyzed in which the reactive component of the generator resistance is set to an unreasonably large value, significantly exceeding those used in practice, and the calculations of such a power supply system are carried out without system analysis. It is shown that this approach to the problem under consideration leads to incorrect results in evaluating both the initial mode and the reactive power compensation mode. As a result of the calculation of the compensation mode by search optimization, it is revealed that the reactive power with an incorrectly set complex resistance of the generator is not fully compensated and the power factor is lower than the coefficient declared in the considered example, equal to unity. The possibility of applying the search optimization method to search for refined parameters of the power supply system that provide specified levels of active power consumption by the load and return of a given level of active power by a synchronous generator is demonstrated. The basis of such calculations is the equilibrium equation and two constraints that specify the levels of active power given by the generator and the consumed load, the solution of which is performed in the MathCAD program using a pair of given-find operators that implement search optimization. Using the search optimization applied to the visual model, the MATLAB program calculates the value of the capacitance of the cosine capacitor at which full compensation of the reactive power in the system is achieved. The parameters of the power supply system calculated by this method provide a 20% reduction in active losses in the power line than in the case of partial reactive power compensation.

© В. Г. Ягуп, Е. В. Ягуп, А. Д. Машин, М. С. Степанчук, 2019

Keywords: synchronous generator, power line, active power, search optimization, mode of full reactive power compensation

Введение. Одним из ключевых показателей качества электрической энергии в промышленных и коммунальных электрических системах является величина реактивной мощности [1]. Ее компенсация традиционно осуществляется включением косинусных конденсаторов, что способствует достижению повышения коэффициента мощности и симметрированию питающих токов [2, 3, 4].

Целью статьи является сравнительный анализ режимов компенсации реактивной мощности в обобщенной однофазной системе электроснабжения при соизмеримых комплексных сопротивлениях нагрузки и линии электроснабжения с последующим уточнением параметров системы для достижения режима полной компенсации реактивной мощности.

Постановка задачи.

В обобщенном случае для расчета реактивной мощности в системах электроснабжения используется выражение

$$Q_k = P(tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \tag{1}$$

где Q_k – реактивная мощность, которую необходимо скомпенсировать для увеличения коэффициента мощности от значения $cos\varphi_1$ до значения $cos\varphi_2$;

P – активная мощность, потребляемая в системе электроснабжения.

По значению Q_k далее вычисляются необходимые емкости косинусных конденсаторов. При использовании формулы (1) режим в системе считается симметричным. Поэтому такой расчет не позволяет определить емкости конденсаторов, обеспечивающих симметрирование режима в системе.

Точно определить параметры симметрирующего устройства (СКУ) позволяет метод поисковой оптимизации с использованием визуальных SimPowerSystems-моделей [4]. Режим полной компенсации является оптимальным в отличие от режима частичной компенсации и соответствует системному подходу, который учитывает свойства всей системы электроснабжения в целом.

Основная часть исследования.

Рассматриваемая в [5] система электроснабжения питается от синхронного генератора (рис. 1).

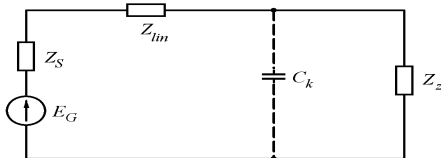


Рисунок 1 – Эквивалентная схема системы электроснабжения

Параметры рассматриваемой схемы в [5] представлены следующими комплексными величинами: эквивалентное сопротивление $Z_z=(2,015+j1,511)$ Ом, комплексное сопротивление асинхронного генератора $Z_s=(0,066+j3,2)$ Ом,

комплексное сопротивление линии электропередачи $Z_{lin}=(0,11+j0,063)$ Ом.

Рассматриваемая эквивалентная схема отображает однофазный вариант для одной фазы системы электроснабжения и предполагает, что трехфазная система абсолютно симметрична. E_G при этом должно представлять фазное напряжение синхронного генератора с действующим значением: $E_G = 6,3/\sqrt{3}$.

При этих условиях определена емкость компенсирующего конденсатора, $C_{CC} = 758 \text{ мкФ}$. Согласно [5] таким образом обеспечивается единичный коэффициент мощности.

Для анализа представленного варианта при системном подходе осуществляется контрольный расчет режима компенсации с применением метода поисковой оптимизации к визуальной модели (рис. 2), составленной в системе SimPowerSystems (SPS).

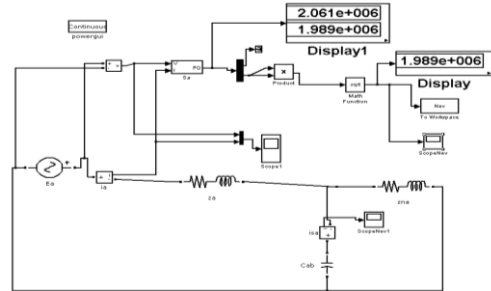


Рисунок 2 – Визуальная модель электро-энергетической системы

В представленной модели комплексные сопротивления генератора z_s и линии электропередачи z_{lin} объединены в один элемент с комплексным сопротивлением $z=z_s+z_{lin}=(0,176+j3,263)$ Ом.

Емкость C_k конденсатора, компенсирующего реактивную мощность, принята в качестве переменной оптимизации. Для источника электроэнергии задается требуемое амплитудное значение напряжения:

$E_{Gm} = E_G \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3} = 5143,9 \text{ В}$. Реактивная мощность источника электроэнергии принята в качестве целевой функции оптимизации. Модель работает во временном интервале, соответствующем единому периоду питающего напряжения с шагом интегрирования $\Delta t = 10^{-4}$ с по методу Розенброка. Полученное значение целевой функции передается с помощью элемента To Workspace в рабочее пространство, а затем обрабатывается встроенной функцией оптимизации fminsearch(). В результате найдено значение емкости конденсатора $C_k = 776,174 \text{ мкФ}$. Однако, значение целевой функции при этом не свелось к нулевому значению. Из рис. 2 видно, что полная мощность, потребляемая от источника, составляет величину $S_S = (2,061 + j1,989) \text{ мВА}$. По окончании процесса оптимизации значение целевой функции устойчиво достигает минимального значения $1,989 \cdot 10^6$, т. е.

происходит лишь частичная компенсация реактивной мощности.

Соответствующий коэффициент мощности

$$\cos \varphi = \frac{2,061}{\sqrt{2,061^2 + 1,989^2}} = 0,72 < 1.$$

Угол отставания тока $\varphi = 43,982^\circ$. Ток от источника в линии электропередачи $\dot{I}_a = 1113,82e^{j(-43,98^\circ)}$. Напряжение на нагрузке и компенсирующем конденсаторе $\dot{V}_{cc} = 3505,83e^{j(-45^\circ)}$.

Ток через нагрузку $\dot{I}_z = 1391,97e^{j(-81,87^\circ)}$ Мощность, потребляемая нагрузкой:

$$S_z = 0,5\dot{V}_{cc} \cdot \dot{I}_z^* = (1,952 + j1,464) \text{ мВА.}$$

В [5] при рассмотрении параметров нагрузки приводятся следующие данные: ток через нагрузку (действующее значение) $I_z = 1375$ А; активная мощность $P_z = 11,43$ мВА; фазное напряжение на нагрузке (действующее значение) $U_z = 3464$ В.

Активная мощность нагрузки 1,952 мВт по результатам моделирования системы меньше задекларированной в [5] и составляющей в пересчете на одну фазу $11,43/3 = 3,81$ мВт. Отношение этих мощностей составляет величину $3,81/1,952 = 1,952$.

Напряжение на нагрузке составляет действующее значение величиной $V_{cc} = 3505,83/\sqrt{2} = 2479$ В.

Также меньше задекларированного в [5] действующего значения $U_z = 3464$ В. Отношение напряжений составляет величину $3464/2479 = 1,397$. Квадрат этой величины как раз составляет отношение мощностей.

Таким образом, уменьшение мощности нагрузки объясняется уменьшением напряжения на нагрузке на 40% по сравнению с расчетным в [5] в режиме компенсации реактивной мощности. При отсутствии же компенсирующего конденсатора положение еще более усугубляется: ток через линию электропередачи и нагрузку $\dot{I}_a = \dot{I}_z = 979,28e^{-j65,35^\circ}$ напряжение на нагрузке $\dot{U}_z = 2466,41e^{-j28,48^\circ}$, мощность, потребляемая нагрузкой, $S_z = (0,9662 + j0,7245)$ мВА, мощность, отдаваемая источником $S_S = (1,051 + j2,289)$ мВА.

Причинами выявленных противоречий является то, что анализ режимов в цепи нагрузки и цепи генератора в [5] проведен раздельно без системного подхода и выбор излишне большого сопротивления генератора в [5]. Особенно велика реактивная составляющая сопротивления генератора $x_S = 3,2$ Ом. Действительно, базовое сопротивление синхронного генератора $z_b = U_G^2 / S_G = 6,3^2 / 15 = 2,646$ Ом.

Относительное значение реактивного сопротивления составляет величину $3,2 / 2,646 \cdot 100\% = 121\%$,

в то время, как на практике эта величина обычно составляет $8 \div 25\%$ для турбогенераторов [6].

При отсутствии системного подхода задача выбора компенсирующего конденсатора из условия компенсации лишь реактивной составляющей проводимости нагрузки в действительности решается буквально в одну строку: $\omega C_{cc} + I_m(1/Z_z) = 0$

Поскольку при $Z_z = 2,015 + j1,511$ проводимость нагрузки $Y_z = 1/(2,015 + j1,511) = 0,31766 - j0,23820$.

Отсюда $C_{cc} = 0,2382 / \omega = 758,22$ мкФ.

Такое решение совершенно не требует использования остальных исходных данных для параметров, приведенных в [5].

Метод поисковой оптимизации [6] позволяет решить обратную задачу – определить суммарное комплексное сопротивление генератора и линии электропередачи, при которых обеспечивается требуемый режим питания нагрузки по напряжению и потребляемой мощности. Это решение в системе MathCAD представлено на рис. 3.

РАСЧЕТ СУММАРНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ СГ И ЛЭП:

$$\begin{aligned} e_z &= \frac{6300}{\sqrt{3}} = 3637,307 \\ zn &:= 2.015 + j \cdot 1.511 = 2.015 + 1.511i \\ z &:= .1 + j = 0.1 + i \quad i := 0 \\ \text{Given} \\ i &= \frac{e}{z + zn} \\ \text{Re}(e \cdot i) &= 4000000 \\ \text{Re}(zn \cdot i) &= 3810000 \\ \left(\begin{matrix} i \\ z \\ zn \end{matrix} \right) &= \text{Find}(i, z) = \left(\begin{matrix} 1099.714798 - 825.497559i \\ 0.100486 + 0.076983i \end{matrix} \right) \\ |i| &= 1375.070 \\ un_z &:= zn \cdot i = 3.463 \times 10^3 - 1.709i \quad |un_z| = 3463.253 \\ un_i &:= 3.81000 \times 10^6 + 2.85703i \times 10^6 \\ \frac{6000}{\sqrt{3}} &= 3464.102 \end{aligned}$$

Рисунок 3 – Расчет суммарного сопротивления синхронного генератора и линии электропередачи

Решение уравнения равновесия и двух ограничений, задающих уровни потребляемых и отдаваемых активных мощностей, осуществляется оптимизационным методом с помощью пары операторов given-find. Решение проведено относительно тока i в линии электропередачи и суммарного комплексного сопротивления Z оператора и линии электропередачи. В результате решения уравнения требуемое комплексное сопротивление генератора и линии электропередачи составляет величину $z = (0,1 + j0,077)$ Ом, что по реактивной составляющей гораздо меньше в сравнении с $(0,176 + j3,263)$ Ом, принятым в [5].

В результате выполнения оптимизации на визуальной модели (рис. 2) найдена емкость компенсирующего конденсатора, которая составляет величину $C = 782,97$ мкФ. При этом мощность,

отдаваемая источником $S_e=4,076$ мВт, мощность, потребляемая нагрузкой $S_z=(3,95 + j2,962)$ мВА. Действующее значение тока в линии электропередачи $I = 1120,49$ А.

Поскольку мощность потерь в линии электропередачи пропорциональна квадрату действующего значения тока, то коэффициент снижения потерь может быть вычислен как отношение квадрата действующего значения тока в линии электропередачи I_{lin} при отсутствии компенсации к квадрату тока $I_{lincomp}$ при введении компенсации:

$$K_{LR} = I_{lin}^2 / I_{lincomp}^2.$$

Для случая частичной компенсации параметров, принятых в [5], $I_{lin} = 787,59$ А и $I_{lincomp} = 692,46$ А, следовательно $K_{LR} = 787,59^2 / 692,46^2 = 1,294$.

При найденных параметрах системы, удовлетворяющим условиям потребления заданного уровня мощности, получаем $I_{lin} = 1375,27$ А, $I_{lincomp} = 1120,49$ А, следовательно $K_{LR} = 1375,27^2 / 1120,49^2 = 1,506$.

Таким образом, полная компенсация реактивной мощности по сравнению с частичной компенсацией оказывается на 20% более эффективной.

Выводы. Расчет компенсирующего устройства и режима компенсации реактивной мощности при отсутствии системного подхода приводит к ошибочным результатам. Необоснованный выбор параметров синхронного генератора, приводит к невозможности осуществления режима полной компенсации реактивной мощности в системе. Метод поисковой оптимизации, реализованный в системе MathCAD, позволил точно определить параметры системы электроснабжения, обеспечивающие условия потребления заданных уровней активной мощности в нагрузке и отдаваемой синхронным генератором активной мощности. При уточненных параметрах системы электроснабжения обеспечивается как

исходный режим системы электроснабжения, так и режим полной компенсации реактивной мощности. Потери активной мощности в линии электропередачи при полной компенсации реактивной мощности на 20% ниже, чем в режиме частичной компенсации, что доказывает эффективность режима полной компенсации реактивной мощности.

Список литературы

1. Кудрин Б. И. Электроснабжение промышленных предприятий. // Б. И. Кудрин – М.: Интернет Люксиниринг, 2006. – 672 с.
2. Герасименко А. А. Передача и распределение электрической энергии. // А. А. Герасименко, В. Т. Федин – Ростов на Дону: Феникс, 2006. – 720 с.
3. E. Acha. Power Electronic Control in Electrical Systems // E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. E. Miller. – Newnes. –2002. –443 p.
4. Ягуп В. Г. Применение оптимизационных методов для решения задач улучшения показателей электрических систем. // В. Г. Ягуп., Е. В. Ягуп. – Харьков: ХНУГХ имени А. Н. Бекетова. – 2017. – 170 с..
5. Міліх В. І. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей//В. І. Міліх, Т. П. Павленко. – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
6. Копылов И. П. Электрические машины. //И. П. Копылов – М.: Высшая школа, 2004. – 607 с.

References

1. Kudrin B. I. Elektrosnabzheniye promyshlennykh predpriyatiy. // B. I. Kudrin – M.: Interenet Lyuksiniring, 2006. – 672 s.
2. Gerasimenko A. A. Peredacha i raspredeleniye elek-tricheskoy energii. // A. A. Gerasimenko, V. T. Fedin – Rostov na Donu: Feniks, 2006. – 720 s.
3. E. Acha. Power Electronic Control in Electrical Systems // E. Acha, V.G. Agelidis, O. Anaya-Lara, T. J. E. Miller. – Newnes. –2002. –443 p.
4. Yagup V. G. Primeneniye optimizatsionnykh metodov dlya resheniya zadach uluchsheniya pokazateley elektricheskikh sistem. // V. G. Yagup., Ye. V. Yagup. – Khar'kov: KHNUGKH imeni A. N. Beketova. – 2017. – 170 s..
5. Milikh V. I. Yelektropostachannya promisllovikh pidpriemstv: Pidruchnik dlya studentiv yelektromekhanichnikh spetsial'no-stey//V. I. Milikh, T. P. Pavlenko. – Kharkiv: FOP Panov A. M., 2016. – 272 s.
6. Kopylov I. P. Elektricheskkiye mashiny. //I. P. Kopylov – M.: Vysshaya shkola, 2004. – 607 s.

Надійшла (received) 30.10.2019

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ягуп Валерій Григорович (Ягуп Валерий Григорьевич, Yagup Valery Grigorievich) – доктор технічних наук, професор, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, професор кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-7019-3499>; e-mail: yagup.valery@gmail.com

Ягуп Катерина Валеріївна (Ягуп Екатерина Валериевна, Yagup Ekaterina Valerievna) – доктор технічних наук, доцент, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, доцент кафедри електричного транспорту; ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9305-8169>; e-mail: kata3140@gmail.com

Машин Олексій Дмитрович (Машин Алексей Дмитриевич, Mashin Alexei Dmitrovich) – магістр, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, магістр кафедри електричного транспорту; e-mail: mashin2004@gmail.com

Степанчук Максим Сергійович (Степанчук Максим Сергеевич, Stepanchuk Maxim Serhiyovych) – магістр, Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова, магістр кафедри електричного транспорту; e-mail: m.stepanchuk@bk.ru