

УДК 621.311

**МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ТРЕХФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С НЕСИММЕТРИЧНОЙ НАГРУЗКОЙ И УПРАВЛЕНИЕМ
ПО ОПТИМИЗАЦИОННОМУ АЛГОРИТМУ****В. Г. Ягуп**Харьковский национальный университет городского хозяйства имени А.Н. Бекетова
ул. Революции, 12, Харьков, 61002, Украина. E-mail: yagup_walery@mail.ru**Е. В. Ягуп**Украинский государственный университет железнодорожного транспорта
пл. Фейербаха, 7, Харьков, 61050, Украина. E-mail: kate.yag@rambler.ru

Рассматривается силовой активный фильтр в трехфазной системе электроснабжения несимметричной нагрузки, представленной активно-индуктивной звездой с существенно отличающимися комплексными сопротивлениями отдельных фаз. Активный фильтр подключается параллельно нагрузке и представляет собой трехфазный инвертор на полностью управляемых полупроводниковых вентилях, шунтированных обратными диодами. Система управления силовым активным фильтром построена по гистерезисному принципу мостовым инвертором с широтно-импульсной модуляцией. Её задачей является формирование таких управляющих сигналов, подаваемых на управляемые силовые приборы инвертора, которые обеспечивают минимизацию разности активных мощностей источников питания и нагрузки. Для измерений суммарных активных мощностей источников и нагрузки используются виртуальные измерители активной и реактивной мощностей. При управлении силовыми приборами активного фильтра необходимо обеспечивать синусоидальный характер токов, отдаваемых источниками электрической энергии, а также совпадение этих токов по фазе с напряжениями источников. Модель такого фильтра реализована в системе SimPowerSystem на основе оптимизационного алгоритма Нелдера–Мида, подпрограмма которого содержится в математическом пакете визуального моделирования. Результаты работы модели представлены в виде временных диаграмм электромагнитных процессов и числовых данных, подтверждающих работоспособность предложенного алгоритма управления силовым активным фильтром.

Ключевые слова: активный фильтр, несимметричная нагрузка, алгоритм оптимизации, визуальная модель.

**МОДЕЛЬ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ТРИФАЗНОЙ ЭЛЕКТРИЧНОЙ СИСТЕМЫ
З НЕСИММЕТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ І КЕРУВАННЯМ
ЗА ОПТИМІЗАЦІЙНИМ АЛГОРИТМОМ****В. Г. Ягуп**Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова
вул. Революції, 12, Харків, 61002, Україна. E-mail: yagup_walery@mail.ru**К. В. Ягуп**Український державний університет залізничного транспорту
пл. Фейербаха, 7, Харків, 61050, Україна. E-mail: kate.yag@rambler.ru

Розглядається силовий активний фільтр у трифазній системі електропостачання несиметричного навантаження, що надано активно-індуктивною зіркою із суттєво різними комплексними опорами окремих фаз. Активний фільтр підключається паралельно навантаженню й є трифазним інвертором на повністю керованих напівпровідникових вентилях, що шунтовані зворотними діодами. Система управління силовим активним фільтром побудована за гистерезисним принципом керування мостовим інвертором із широтно-імпульсною модуляцією. Її завданням є формування таких керуючих сигналів, що подаються на керовані силові прилади інвертора, які забезпечують мінімізацію різниці активних потужностей джерел живлення й навантаження. Для вимірювань сумарних активних потужностей джерел і навантаження використовуються віртуальні вимірювачі активної й реактивної потужностей. При управлінні силовими приладами активного фільтра необхідно забезпечувати синусоїдальний характер струмів, що віддаються джерелами електричної енергії, а також збіг цих струмів по фазі з напругою джерел. Модель такого фільтра реалізована в системі SimPowerSystem на основі оптимізаційного алгоритму Нелдера–Мида, підпрограма якого міститься в математичному пакеті візуального моделювання. Результати роботи моделі надано у вигляді часових діаграм електромагнітних процесів і числових даних, що підтверджують працездатність запропонованого алгоритму управління силовим активним фільтром.

Ключові слова: активний фільтр, несиметричне навантаження, алгоритм оптимізації, візуальна модель.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Несимметрия нагрузки в трехфазных системах электроснабжения заметно ухудшает условия передачи электроэнергии. Возникающая при этом неравномерность загрузки отдельных фаз порождает реактивную мощность несимметрии, из-за которой возрастают потери в линиях электропередачи, снижаются напряжения на нагрузке, наблюдаются перегрузки питающих трансформаторов. Такие несимметричные режимы характерны для систем электроснабжения коммунального хозяйства, железнодорожного транспорта на переменном токе, сельскохозяйственных потребителей, обладающих заметной несимметрией. Поэтому симметрирование трехфазных систем электроснабжения и компенсация в них реактивной мощности представляют собою весьма актуальную задачу, решение которой позволяет повысить энергетические показатели и в конечном счете снизить расход топлива на первичных двигателях электроэнергетических систем.

Традиционно указанная задача решалась с помощью стандартных методов и средств симметрирования и компенсации реактивной мощности. В частности, батареи косинусных конденсаторов позволяют достаточно успешно обеспечивать решение проблем симметрирования и компенсации реактивной мощности. В последнее время благодаря развитию элементной базы силовой полупроводниковой электроники и выпуску относительно дешевых промышленных микроконтроллеров появилась возможность применения силовых активных фильтров [1–4]. Силовые структуры активных фильтров построены по относительно несложным схемам мостовых инверторов с широтно-импульсной модуляцией [1], питающим напряжением которых является напряжение на накопительном конденсаторе. Заряд этого конденсатора обеспечивается через цепи обратных диодов управляемых вентилей инвертора [2–7]. Однако система управления силовым активным фильтром представляет собой достаточно сложное интеллектуальное устройство, реализуемое на микроконтроллерах по специальным алгоритмам. Последние осуществляют ряд промежуточных преобразований измеряемых электрических величин в системе электроснабжения [4]. Системы управления должны отслеживать изменения токов в линии электропередачи. С помощью преобразований токов и напряжений по формулам Кларка и Парка на основе теории мгновенной мощности вычисляются необходимые параметры управления инвертором напряжения. При таком управлении по релейному принципу формируются токи инвертора, обеспечивающие компенсацию реактивной мощности и симметрирование токов в линиях электропередачи.

Между тем использование оптимизационных алгоритмов положительно зарекомендовало себя при расчетах параметров пассивных симметрирующих устройств [8]. При этом оптимизация режима системы электроснабжения осуществлялась на модели с помощью алгоритмов поисковой оптимизации методом деформируемого многогранника и обеспечивала высокую точность и общность решения задачи. Поэтому вполне обоснованной представляется попытка применить эти алгоритмы к системам электроснабжения с силовыми активными фильтрами.

Целью исследования является разработка принципов организации системы управления силовым активным фильтром на основе алгоритмов поисковой оптимизации применительно к трехфазной трехпроводной системе электроснабжения на синусоидальном токе с несимметричной нагрузкой.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Схема исследуемой системы электроснабжения в виде визуальной модели приведена на рис. 1. Здесь несимметричная нагрузка питается от трехфазной системы питающих напряжений через симметричную линию электропередачи. Параметры системы приняты такими же, как в [8], что даёт возможность сравнить результаты исследования с точными значениями. Сопротивления линии электропередачи равны $j\omega 0,001$ Ом, сопротивления нагрузок по фазам А, В и С соответственно принимаются равными $0,7 + j\omega 0,005$; $1,0 + j\omega 0,01$; $2,0 + j\omega 0,04$ Ом. Амплитуды питающих напряжений приняты 100 В, а частота – 50 Гц. Система питающих напряжений симметрична, несимметрия режима обуславливается лишь нагрузкой. Предварительно рассчитан и смоделирован несимметричный режим рассматриваемой системы. Временные диаграммы токов в линиях электропередачи, являющихся одновременно и токами питающих источников напряжения, в несимметричном режиме приведены на рис. 1. Исходный несимметричный режим обуславливает большую разницу амплитуд токов в линиях электропередачи, когда токи в фазах А и В в три раза превосходят токи в фазе С. Их амплитуды соответственно равны 31,494, 30,995 и 10,342 А, а значения коэффициентов мощности составляют соответственно 0,608, 0,061 и 0,337. Симметричные составляющие токов равны $I_1=22,96$ и $I_2=12,63$ А, а сдвиг величины напряжения общей точки соединения нагрузки относительно нулевой точки источников напряжения составляет величину около 40 В. Все это свидетельствует о том, что система подвержена существенной несимметрии.

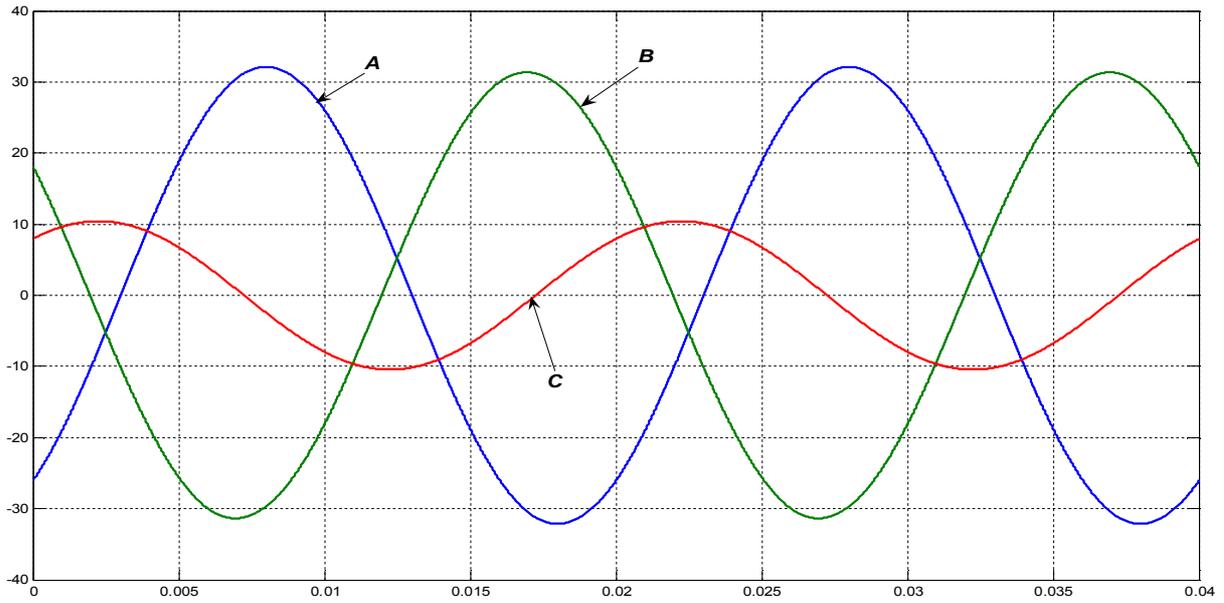


Рисунок 1 – Токи в лініях електропередачі системи в несиметричному режимі

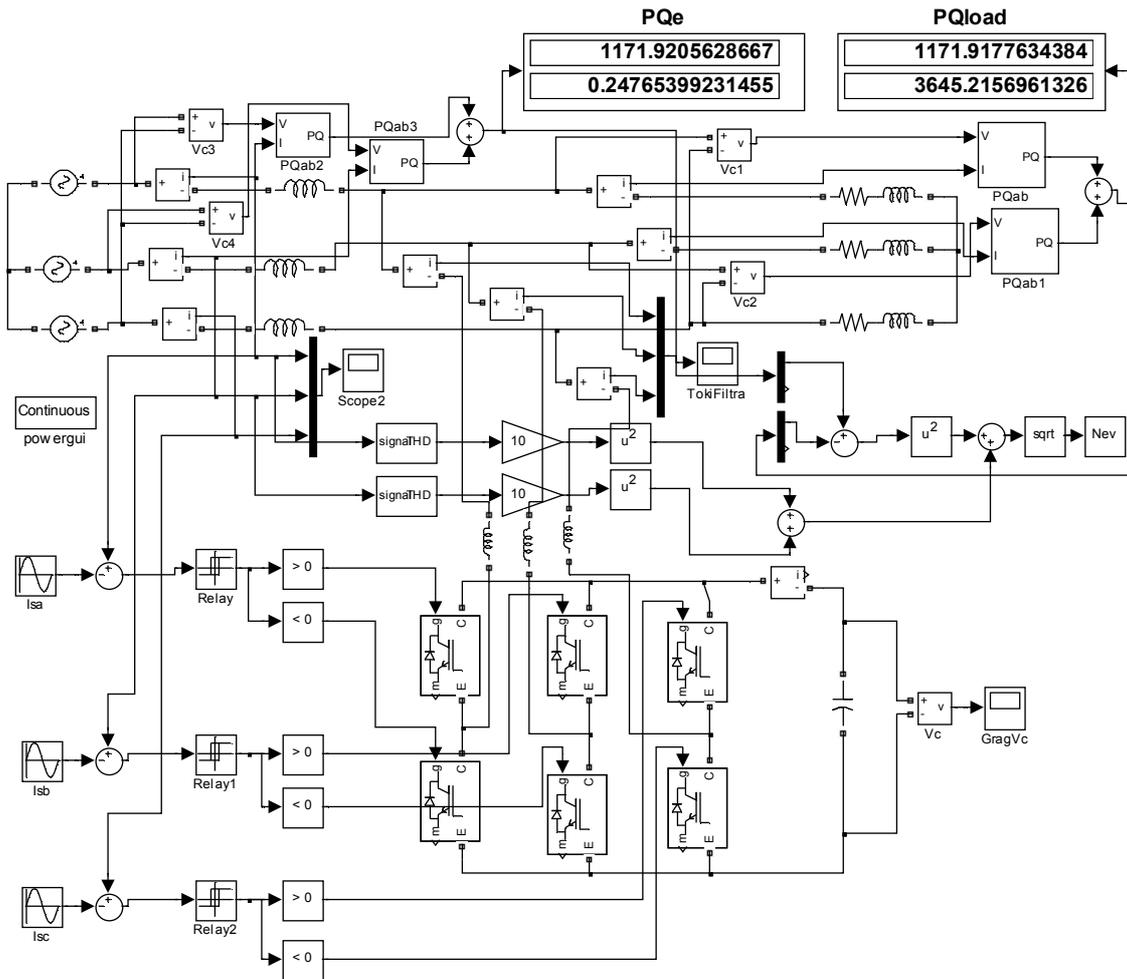


Рисунок 2 – SPS-модель системи електропостачання з паралельним силовим активним фільтром

Параллельно нагрузке подключен силовой активный фильтр на IGBT транзисторах с шунтирующими обратными диодами. Ток в систему инжектируется от силового активного фильтра через дроссели. Транзисторы должны управляться таким образом, чтобы активный фильтр сформировал корректирующие токи, обеспечивающие для рассматриваемой системы минимизацию реактивной мощности, отдаваемой источниками питания. При этом должны быть скомпенсированы составляющие реактивной мощности, обусловленные как реактивным характером нагрузок, так и их несимметрией. Как следствие полной компенсации реактивной мощности, токи в линиях передачи и источниках должны уравниваться в амплитудах и полностью совпасть по фазам с соответствующими питающими напряжениями. В этом режиме источники генерируют лишь активную мощность, которая потребляется активными составляющими сопротивлений нагрузки и линии электропередачи.

Как видно из модели, для получения управляющих импульсов, подаваемых на силовые транзисторы, используется три идентичных канала управления. На вход каждого канала подается сигнал, равный току источника питания соответствующей фазы. Эти сигналы снимаются виртуальными измерителями токов. Из этого тока вычитается сигнал, генерируемый источником эталонного тока. Задающий ток последнего должен совпадать по фазе и частоте с задающим напряжением источника питания соответствующей фазы. Поэтому фазы эталонных токов должны быть сдвинуты друг относительно друга на 120 электрических градусов подобно тому, как сдвинуты друг относительно друга питающие напряжения силовой системы. Амплитуды токов эталонных источников должны быть одинаковы, поэтому везде они принимаются равными некоторому параметру, подлежащему определению в процессе оптимизации.

Выделяемая разность между величиной тока фазы питающего источника и эталонным током фазы подается на гистерезисный элемент [9, 10]. Он настраивается таким образом, чтобы выходные значения его сигнала составили значения (+1) и (-1), а ширина зоны гистерезиса по входному сигналу была достаточно малой, чтобы точно воспроизводить эталонный сигнал. В данном случае принимались значения (+0,1) и (-0,1) А.

Сигнал с выхода гистерезисного элемента подается на элементы сравнения с нулем, которые фактически выделяют положительную и отрицательную части сигнала, получаемого на выходе гистерезисного элемента. Первая часть подается на верхний транзистор плеча соответствующей фазы, а вторая – на нижний транзистор этого же плеча этой же фазы. Можно отметить, что используемая модель системы управления широтно-импульсной модуляции является наиболее простой и надежной, поскольку она обходится минимумом вычислительных блоков, что

обуславливает её экономичность по вычислительным затратам и простоту в реализации.

Предлагаемый принцип управления использует указанные особенности режима. Тогда задача выхода на режим компенсации реактивной мощности может рассматриваться как обеспечение корректирующими токами минимизации разности между суммарными активными мощностями источников и нагрузки. Для вычисления мощностей, отдаваемых питающими источниками, измеряются их токи и напряжения с помощью виртуальных приборов. Результаты этих измерений передаются на виртуальные PQ-вычислители активной и реактивной составляющих полной мощности. Суммарная реактивная мощность источников фиксируется цифровым виртуальным прибором RMist, что позволяет оценить эффективность полученного решения. Аналогичные измерения полной мощности предусмотрены и для нагрузки. Разность сумм активных мощностей источников и нагрузки образуют составляющую по мощности для целевой функции. Параметром оптимизации служит амплитуда токов источников, фазы которых привязаны к фазам напряжений симметричной системы питания. Для рассматриваемого случая линейной нагрузки необходимо обеспечить также минимизацию в кривых токов источников и корректирующих токов высших гармоник, что обеспечивается включением соответствующих показателей в целевую функцию. С этой целью токи активного фильтра подвергаются гармоническому анализу с помощью виртуального анализатора гармоник Fourier block или вычислителя коэффициента гармоник THD. Полученные в результате анализа показатели по высшим гармоникам образуют составляющие целевой функции по гармоникам. Для уравнивания значимости этих составляющих предусмотрен усиливающий коэффициент. Его величина может определенным образом влиять на скорость сходимости к решению, поэтому предусмотрена возможность его изменения в процессе оптимизации. Комплексная целевая функция вычисляется как шаровая метрика от указанных составляющих.

Запуск процесса оптимизации может осуществляться от некоторого начального значения напряжения на накопительном конденсаторе инвертора. При нулевом значении начального напряжения на конденсаторе протекает переходный процесс. Длительность этого процесса может быть относительно большой, что замедляет процесс оптимизации, поэтому целесообразно задавать значение начального напряжения на конденсаторе близким к установившемуся значению. Ориентировочно это значение определяется как выходное напряжение эквивалентного мостового выпрямителя, образованного обратными диодами и заряжающего накопительный конденсатор инвертора. Это значение может быть также включено как составляющая целевой функции, и в этом случае решение будет найдено, в том числе и для установившегося значения этого напряжения.

Процесс оптимизации заключается в том, что на каждом шаге итерации: а) модель обрабатывает интервал моделирования, достаточный для достижения установившегося режима; б) показания виртуальных приборов передаются в рабочую область; в) вычисляется значение целевой функции с помощью программной функции и передается в библиотечную функцию оптимизации `fminsearch()`; г) функция оптимизации по алгоритму деформируемого многогранника осуществляет коррекцию параметров оптимизации.

На рис. 3 показаны токи в линиях электропередачи после достижения оптимального режима. Най-

денное значение амплитуд этих токов составляет величину $7,771/117$ А, что близко к точному решению $7,8142244$ А. Суммарная реактивная мощность источников при несимметрии 3283 Вар свелась к значению $0,248$ Вар. На рис. 4 приведены графики корректирующих токов, генерируемых силовым активным фильтром. Эти токи практически совпадают и по амплитудам, и по фазам с токами симметрично-компенсирующих конденсаторов, емкости которых были точно вычислены для рассматриваемого случая в [8].

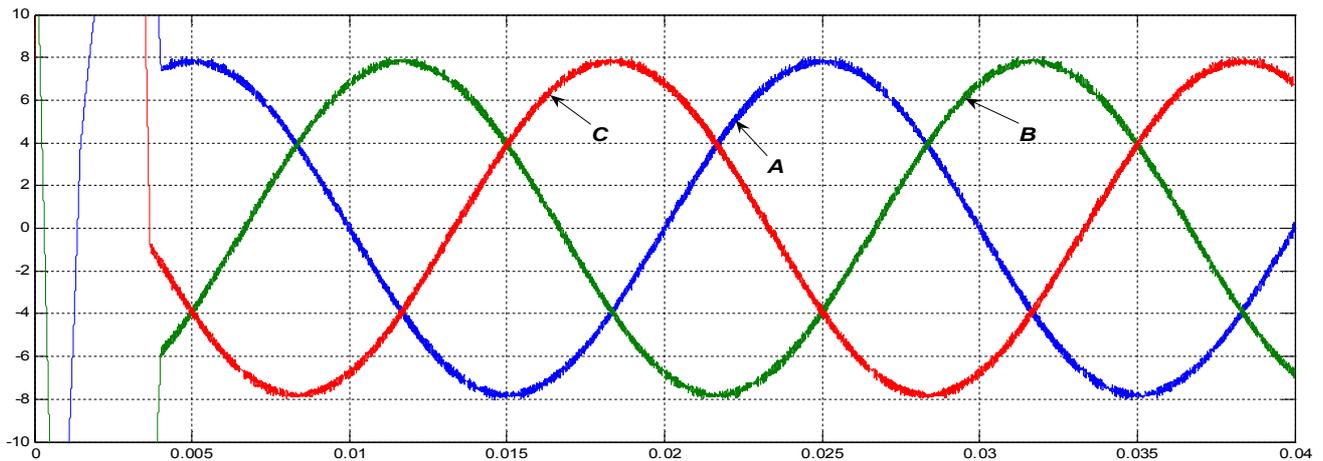


Рисунок 3 – Токи в линиях электропередачи после завершения оптимизации режима

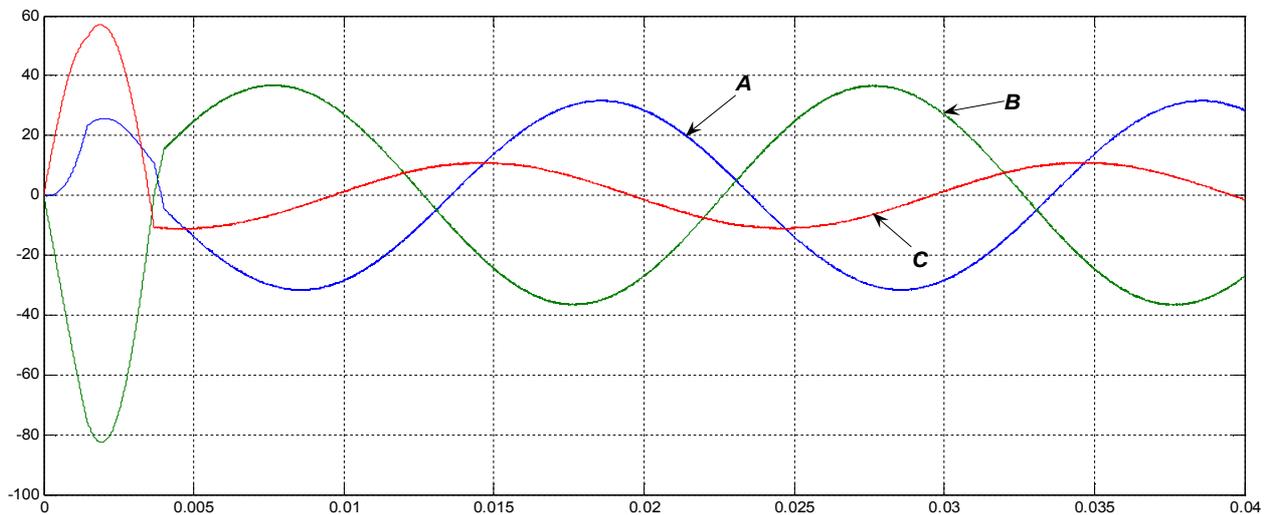


Рисунок 4 – Корректирующие токи, генерируемые силовым активным фильтром

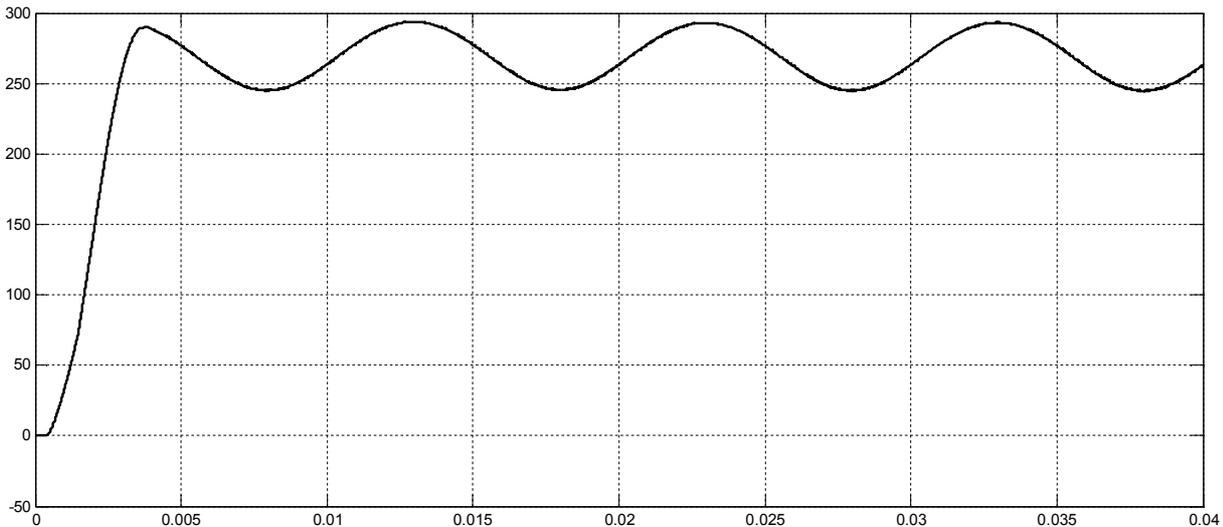


Рисунок 5 – Напряжение на накопительном конденсаторе силового активного фильтра

На рис. 5 приведена временная диаграмма напряжения на накопительном конденсаторе силового активного фильтра. Начальное значение этого напряжения принималось нулевым, поэтому первые четверть периода, как видно из диаграммы, протекает переходный процесс заряда конденсатора через обратные диоды, шунтирующие силовые транзисторы активного фильтра. На интервале этого переходного процесса транзисторы заперты и на управляющие сигналы не реагируют. Накопительный конденсатор забирает на себя энергию, запасённую в дроселях активного фильтра, поэтому напряжение на конденсаторе может существенно превышать амплитуду питающего напряжения питающих источников энергии.

При выходе на решение в процессе оптимизации после заряда конденсатора напряжение на конденсаторе изменяется по периодическому закону. В остальных случаях напряжение на конденсаторе либо нарастает – если конденсатор получает от источников питающего напряжения избыточную энергию, либо убывает – если энергия от источников недостаточна для поддержания работы активного фильтра.

ВЫВОДЫ. Предложен принцип управления силовым активным фильтром на основе оптимизационного алгоритма, позволяющий обойтись без промежуточных преобразований электрических величин в системе управления фильтра. В качестве критерия оптимизации принимается разность суммарных активных мощностей источников и нагрузки. Показано, что при этом критерий оптимизации должен учитывать также коэффициент гармоник, что обеспечивает правильную работу активного фильтра без искажений синусоидальности токов и напряжений в системе. Реализация предложенного метода на модели показала его работоспособность и достаточно высокую точность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rashid Muhammad H. Power Electronics Handbook. – Academic Press, 2001. – 895 p.
2. Benysek G., Pasko M. Power Theories for Improved Power quality. – Springer-Verlag London, 2012. – 213 p.
3. Strzelecki R., Benysek G. Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks. – Springer-Verlag London Limited, 2008. – 414 p.
4. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning // IEEE Press. – 2007. – 379 p.
5. Жежеленко В.И. Высшие гармоники в системах электроснабжения предприятий. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 331 с.
6. Розанов Ю.К., Рябчицкий М.В., Кваснюк А.А. Современные методы регулирования качества электроэнергии средствами силовой электроники // Электротехника. – 1999. – Вып. 4. – С. 28–32.
7. Колб А.А. Система автоматического регулирования качества электроэнергии на основе полностью управляемых инверторов с релейно-векторным управлением // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2004. – Вип. 2/2004 (25). – С. 37–41.
8. Ягуп В.Г., Ягуп Е.В. Расчет режима компенсации реактивной мощности в несимметричной системе электроснабжения методом поисковой оптимизации // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія «Електротехніка і енергетика». – Вип. 11 (186). – Донецьк: ДНТУ, 2011. – С. 449–454.
9. Documentation – SimPowerSystems [Online]. – Available at: < <http://www.mathworks.com/help/toolbox/phymod/powersys/> >
10. SimPowerSystems™ – User’s Guide [Online] Available at: < http://www.mathworks.cn/help/pdf_doc/phymod/powersys/powersys.pdf >

**MODEL OF ACTIVE FILTER FOR THREE-PHASE POWER SUPPLY SYSTEMS
WITH UNBALANCED LOAD CONTROLLED WITH OPTIMIZATION ALGORITHM**

V. Yagup

Kharkiv National University of Municipal Economy
ul. Revolyutsii, 12, Kharkov, 61002, Ukraine. E-mail: yagup_walery@mail.ru

K. Yagup

Ukrainian State Academy of Railway Transport
pl. Feyyerbakha, 7, Kharkov, 61050, Ukraine. E-mail: kate.yag@rambler.ru

The power active filter in a three-phase power system with unbalanced load is considered. The active filter is connected parallel to the load, and a three-phase inverter with a fully controlled semiconductor valves, shunted wheeling diodes. The control system power active filter is built on the principle of hysteretic inverter bridge with pulse width modulation. The main goal is to create such control signals supplied to the inverter-controlled power devices, which provide minimization of the difference between the active power source and load. To measure total active power source and load virtual meters of active and reactive power are in use. When control of the power active filter devices need to provide sinusoidal current delivered by the source of electrical energy, as well as the coincidence of these currents in phase with the source voltage. The model of such a filter is implemented in system SimPowerSystem based optimization algorithm Nelder-Mead, the subroutine which is contained in the mathematical software of the visual package as a library routine. The results of the model are presented in the form of timing diagrams of electromagnetic processes and numerical data confirming the operability of the proposed algorithm controls the power active filter.

Key words: active filter, unbalanced load, optimization algorithm, visual model.

REFERENCES

1. Rashid, Muhammad H. (2001), Power Electronics Handbook, *Academic Press*, USA.
2. Benysek, G. and Pasko, M. (2012), Power Theories for Improved Power Quality, *Springer-Verlag*, London.
3. Strzelecki, R. and Benysek, G. (2008), Power Electronics in Smart Electrical Energy Networks, *Springer-Verlag*, London.
4. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007), Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, *IEEE Press*.
5. Zhezhelenko, V.I. (2000), *Vysshie garmoniki v sistemakh elektrosnabgenia predpriyatiy* [Ultraharmonics in the systems of power supply of enterprises], Energoatomizdat, Moscow. (in Russian)
6. Rozanov, J.K., Ryabchitsky, M.V. and Kvasnyuk, A.A. (1999), "Modern methods of electric power quality adjusting by power electronics", *Electrotechnika*, Vol. 4, pp. 28–32. (in Russian)
7. Kolb, A.A. (2004), "The system of automatic control of electric power quality on the basis of the fully controlled inverters with relay vector control", *Visnyk Kremenchutskoho derzhavnoho politekhnichnoho universytetu*, Vol. 2, no. 25, pp. 37–41. (in Russian)
8. Yagup, V.G. and Yagup, K.V. (2011), "The calculation of mode of reactive power compensation in asymmetrical power supply system with searching optimization method", *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya "Elektrotekhnika i enerhetyka"*, Vol. 11, no. 186, pp. 449–454. (in Russian)
9. Documentation – SimPowerSystems [Online], Available at: <<http://www.mathworks.com/help/toolbox/physmod/powersys/>>
10. SimPowerSystems™ – User's Guide [Online], Available at: http://www.mathworks.cn/help/pdf_doc/physmod/po-wersys/powersys.pdf

Стаття надійшла 17.08.2015.