



ПРИМЕНЕНИЕ АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ НОРМАЛИЗАЦИИ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ, СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ

Насыров¹ Р.Р., Альдженди² Р., Хербек³ Т.

^{1,2}Московский энергетический институт, г. Москва, Россия

³Тишрин университет, г. Латакия, Сирия

nasirov.rinat@gmail.com, aljendy_raseel@yahoo.com, dr.tarekherbek@tishreen.edu.sy

Резюме: Совокупность характеристик, обуславливающих качество электроэнергии (КЭ) может быть использовано для описания состояния и эффективности работы системы электроснабжения с точки зрения влияния электромагнитных помех. Воздействие электромагнитных помех на электротехническое оборудование проявляется в сокращении времени безотказной работы, дополнительных потерях активной мощности, потерях данных т.д. Наиболее распространенными источниками помех в современных условиях являются электроприемники потребителей с нелинейной вольт-амперной характеристикой. Данный вид электроприемников создает искажение формы кривой тока и напряжения. Ввиду широкого распространения таких электроприемников в быту и промышленности необходимо уделять особое внимание вопросам гармонических искажений. В данной статье представлены результаты измерений и анализа качества электроэнергии, а также показан эффект применения активного фильтра (АФ) с целью обеспечения качества электроэнергии в распределительной сети (66/20 кВ) города Латакия Сирийской Арабской Республики. Дано определение оптимальной емкости звена постоянного тока АФ с помощью метода роя частиц с целью минимизации суммарного коэффициента несинусоидальности тока и напряжения в исследуемой электрической сети.

Ключевые слова: качество электроэнергии, суммарный коэффициент несинусоидальности тока и напряжения, активный фильтр, метод роя частиц.

Для цитирования: Насыров Р.Р., Альдженди Р., Хербек Т. Применение активного фильтра для нормализации качества электроэнергии в электрической сети, Сирийской Арабской Республики // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 1. С. 18-27. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-18-27.

POWER QUALITY ASSURANCE IN THE ELECTRICAL NETWORK OF THE SYRIAN ARAB REPUBLIC, USING THE ACTIVE POWER FILTER

RR Nasyrov¹, R Aljendy², T Kherbek³

^{1,2}Moscow Power Engineering Institute, Moscow, Russia

³Tishreen University, Latakia, Syria

nasirov.rinat@gmail.com, aljendy_raseel@yahoo.com, dr.tarek.kherbek@gmail.com

Abstract: The set of characteristics that determine the power quality (PQ) can be used to describe the state and efficiency of the power supply system in terms of the influence of electromagnetic interference. The impact of electromagnetic interference on electrical equipment is manifested in the reduction of uptime, additional losses of active power, data loss, etc. The most common sources of interference in modern conditions are consumers with non-linear volt-ampere characteristics. This type of electrical receivers creates a distortion of the current and voltage waveform. In view of the widespread use of these power consumers in daily life and industry, special attention should be paid to the problems of harmonic distortion. This article presents the results of measurements and analysis of the quality of electricity, and also shows the effect of applying an active filter (AF) to ensure the quality of electricity in the distribution network (66/20 kV) of the city of Lattakia in the Syrian Arab Republic. The definition of the optimal capacitance of

the AF dc link using the particle swarm method is given in order to minimize the total non-sinusoidal current and voltage in the studied electrical network.

Keywords: power quality, Total harmonics distortion (THD), Active power filter, Optimization, Particle swarm optimization.

For citation: Nasyrov RR, Aljendy R., Kherbek T. Power quality assurance in the electrical network of the syrian arab republic, using the active power filter. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(1):18-27. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-18-27.

Введение

Качество электроэнергии влияет на производительность работы потребителей. Поэтому одна из задач работы системы электроснабжения может быть сформулирована как обеспечение бесперебойного электроснабжения потребителей напряжением, установленного качества [1-5].

В условиях роста числа потребителей и широкого распространения электроприемников с нелинейной вольтамперной характеристикой, бурно развиваются средства компенсации высших гармоник. В последние годы АФ, как средство компенсации высших гармоник, стал растущей областью исследований благодаря усовершенствованию силовых электронных преобразователей [6-8]. Активные фильтры используют в качестве шунтирующих устройств для уменьшения гармоник, которые создаются нелинейными нагрузками и компенсируют реактивную мощность. В этой статье АФ используются для ослабления гармоник, создаваемых нелинейной нагрузкой в исследуемой электрической сети. Немаловажная роль играет определение оптимального значения емкости конденсатора фильтра (С), поскольку это значение, в свою очередь, влияет на работу АФ в целом. В данной работе для определения оптимального значения емкости конденсатора АФ использовался метода роя частиц (РЧ).

Краткая характеристики системы электроснабжения Сирии

Национальная электрическая сеть Сирии объединяет в синхронную работу всю территорию страны. Цепи переменного тока с номинальной частотой 50 Гц используются для передачи электроэнергии от генерации к потребителям. Номинальные уровни напряжения в системе образующей сети 400 кВ и 230 кВ, средний уровень напряжения 66 и 20 кВ [1-5]. Структура генерации электроэнергии в сирийской энергетической системы в период с 2010 до 2016 года представлены на рис.1 [1].

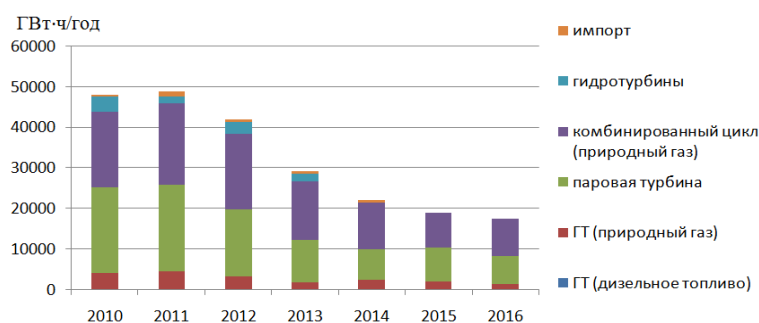


Рис.1 Структура генерации электроэнергии в сирийской энергетической системы.

Для Сирии характерен дефицит генерирующих мощностей. Со второй половины 80-х годов, вследствие осложнившейся политической обстановки, производство электроэнергии снизилось, спрос на нее не мог быть удовлетворен в полном объеме. К 1993 году баланс между производством и спросом на электроэнергию достиг максимального значения: при общей мощности генерации 1879 МВт, потребность в активной мощности в режиме наибольших нагрузок составляла 2376 МВт. Среди причин возрастания спроса на электроэнергию можно выделить относительно высокий прирост населения (3,36% в 1993 году), относительно быстрые темпы экономического роста (8,4% в период с 1990 по 1993 год) и потенциальный спрос со стороны горнодобывающей отрасли [1].

Все потребители электроэнергии условно делятся на следующие группы: коммунально-бытовые; промышленные; производственные потребители сельского хозяйства; прочие потребители. Распределение электроэнергии по типам потребителей в сирийской электрической системе на 2009 год представлено в табл.1.

Таблица 1

Распределение электроэнергии по типам потребителей	
Тип потребителей	Процент потребления от общего объема
Коммунально-бытовые	51,6%
Промышленность	23,49%
Сельское хозяйство	7,02%
Обслуживание	10,08%
Добывающая промышленность и переработка нефти	2,77%
Государственные органы, храмы и уличного освещения	4,01%
Изделия ручной работы и другие	1,02%

Как видно из приведенной выше таблицы, промышленный сектор является вторым по объему потребляемой электроэнергии в Сирийской Арабской Республике, где большинство городов являются промышленными, например, Дамаск, Алеппо и Латакия [4].

Анализ состояния качества электроэнергии в городе Латакия

Исследуемая электрическая сеть г. Латакия состоит из 12 трансформаторных подстанций 66/20 кВ. Нагрузка представляет собой промышленные предприятия, коммунально-бытовые нагрузки и мелкая промышленность. Схема электроснабжения г. Латакия представлена на рис.2.

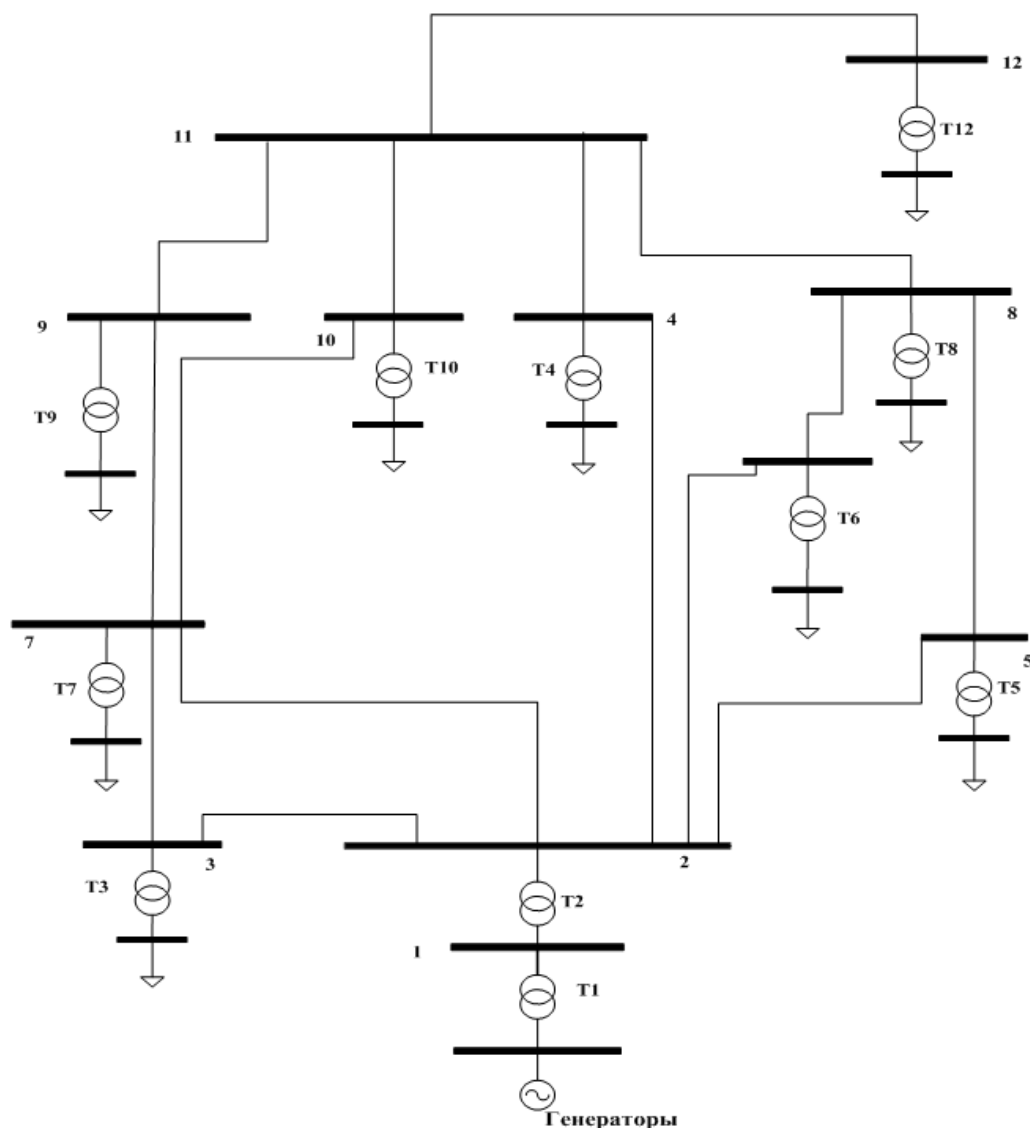


Рис.2. Распределительная схема электрической сети в Латакии (66/20 кВ)

Мощность и число трансформаторы в каждом подстанции представлены в табл.2.

Таблица.2

Мощность и число трансформаторов

	число трансформаторов	Мощность (МВА)
3 – Жилой квартал	2	30
4 – Тишрийн Университет	2	20
5 – Жилой квартал	2	30
6 – Завод автомобилей	2	20
7 – Порт	2	30
8 – Текстильный завод	2	20
9 – Жилой квартал	2	30
10 – Спортивный город	2	20
12 – Жилой квартал	2	20

Морской порт Сирии и военная морская база (ВМБ), расположенные в г. Латакия, находятся на побережье Средиземного моря и включают в себя рейд, внешнюю гавань, защищенную молом, и 2 внутренних бассейна. ВМБ и порт Латакии доступны для кораблей и судов с осадкой до 8 м. Длина причального фронта около 2 км с глубинами 3,3-9,5 м. Суммарный оборот морских грузоперевозок порта около 2,4 млн. т [1].

Порт Латакии был основан 12 февраля 1950 г. В соответствии с Декретом № 38 поручено развивать морской порт. Порт способствует обслуживанию национальной экономики, внешней торговли Сирии и международной транзитной службы.

В силу наличия нелинейной нагрузки порта, провиделись исследования КЭ на подстанции порта. Искажения напряжения характеризуются коэффициентом искажения синусоидальной формы кривой напряжения, обозначает в Российской литературе K_U , однако в английской литературе обозначает U_{thd} , а I_{thd} (*Total Harmonic Distortions*) для характеристики искажения синусоидальной формы кривой тока (в России не нормируется для сетей общего назначения). В некоторых докладах порта Латакии указывается, что суммарный коэффициент гармоник напряжения превышает 12%, что приводит к увеличению потерь, выходу из строя конденсаторов средств компенсации реактивной мощности, а также ряд нарушений в работе электроприемников порта.

Результаты измерений показывают, что нарушение требований стандарта *IEEE-519* по гармоническим составляющим происходит только в узле 7. Спектр высших гармоник напряжения в узле 7 (порт города) и гармоник суммарного тока низкой стороны подстанции 7 представлены на рис.3, суммарный коэффициент несинусоидальности тока и напряжения (THD_I и THD_U) составляют, соответственно 10,71% и 12,16%.

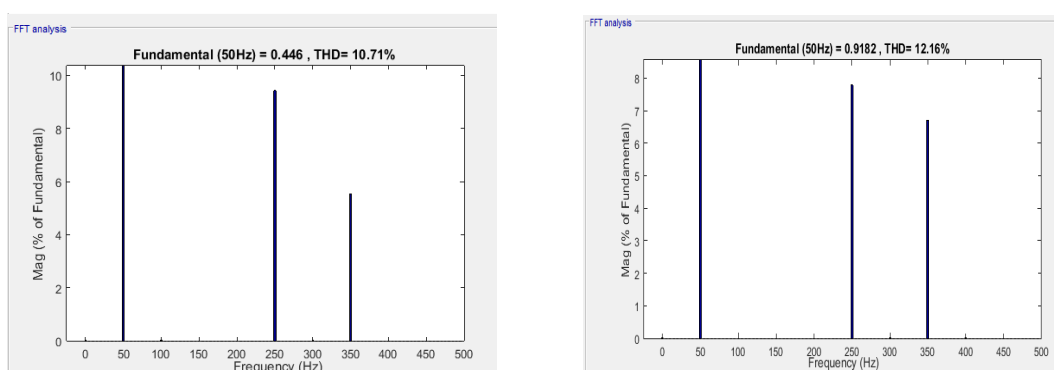


Рис.3 Коэффициенты искажения синусоидальной формы кривой тока и напряжения THD_I и THD_U , а) для тока б) для напряжения

Применение активных фильтров

Фильтрокомпенсирующие устройства являются одним из универсальных способов снижения токов и напряжений высших гармоник в системах электроснабжения. Фильтры гармоник подразделяются на пассивные, активные, и гибридные фильтры [1-2]. В качестве средства компенсации высших гармоник в исследуемой сети рассматривается АФ. Активные фильтры применялись с конца 1990-х годов и в настоящее время относительно широко применяются в промышленных приложениях для компенсации гармоник и

реактивной мощности. Активный фильтр состоит из трех основных частей: силовой части, системы управления и накопительного элемента. Силовая часть, представляет собой быстродействующий трехфазный, многоуровневый инвертор на транзисторах типа *IGBT*. Система управления определяет последовательность, длительность и моменты зажигания транзисторов. Накопительный элемент представляет собой емкость [9-12].

Определение оптимального значения емкости конденсатора АФ является непростой задачей для исследователей. В работах, связанных с выбором параметров АФ, не раскрывается подход к определению этого значения [13-16]; есть работы, в которых используется очень сложное математическое описание [17], что затрудняет их использование из-за наличия большого числа входных данных, определение которых также не всегда доступно для решения проектных задач. В данной работе применен метод оптимизации РЧ для определения оптимального значения емкости АФ.

В основе методе РЧ лежит представление о наборе частиц, перемещающихся в пространстве поиска. Алгоритм начинается с создания исходных частиц и назначения им начальных (исходных) скоростей. Метод позволяет определить значение целевой функции выбора емкости АФ в каждой точке, где побывала частица, и определяет наилучшее (минимальное) значение функции и наилучшее местоположение частиц. Затем алгоритм итеративно корректирует текущую координату каждой частицы и ее скорость. Итерации продолжаются до тех пор, пока критерий остановки не выполнится [18-19]. Блок схема метода РЧ представлен на рис.4.



Рис.4 Блок схема метод РЧ

Целевая функция для достижения оптимальных значений емкости конденсатора, при которой значение коэффициента искажения синусоидальной формы кривой тока минимально, задавалась так:

$$\text{Minimize}(C) = \int_0^{\infty} t^* THD_i^2 dt \quad (1)$$

где t - время моделирования

В результате применения метода РЧ было определено оптимальное значение емкости конденсатора, которое составляет 8300 мкФ.

Активный фильтр применен для смягчения гармоник на шине 7 исследуемой сети. Уровень искажений тока и напряжения снизился. Результаты моделирования показали, что уровень высших гармоник тока с АФ уменьшился с 10,71% до 1,67%, а коэффициент искажения синусоидальной формы кривой напряжения уменьшился с 12,16% до 2,59% (см. рис. 5).

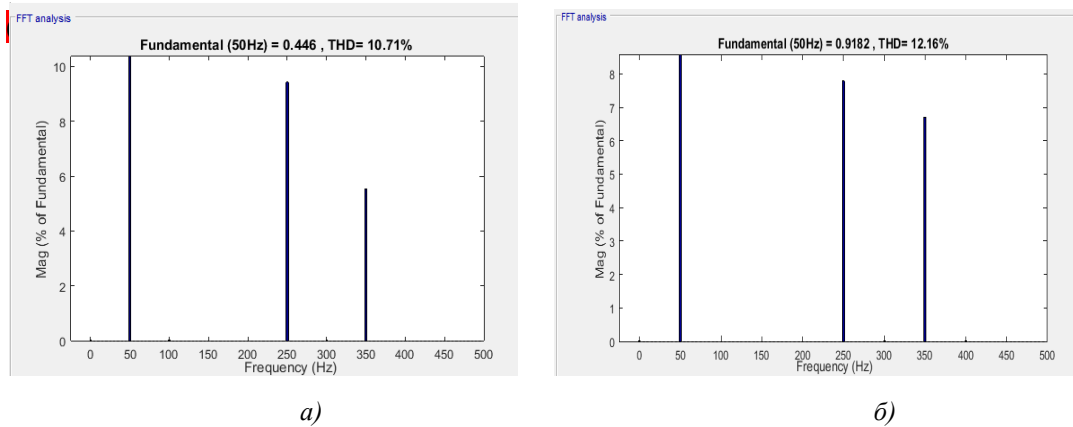


Рис.5 Коэффициенты искажения синусоидальной формы кривой тока и напряжения THD_i и THD_U , а) для тока б) для напряжения при использовании активного фильтра

5. Численный пример использования алгоритма РЧ

Требуется найти значение x , определяющее максимум $f(x)$ с помощью алгоритма РЧ

$$f(x) = -x^2 + 5x + 20, \quad (2)$$

$$-10 \leq x \leq 10. \quad (3)$$

Решение:

1. Выберем случайным образом исходную популяцию, состоящую из 9 частиц с начальными позициями, представленными ниже: номер итерации = 0

$$x_1^0 = -9, 6; x_2^0 = -6; x_3^0 = -2, 6;$$

$$x_4^0 = -1, 1; x_5^0 = 0, 6; x_6^0 = 2, 3;$$

$$x_7^0 = 2, 8; x_8^0 = 8, 3; x_9^0 = 10.$$

По формуле (2) рассчитываем значения целевой функции (ЦФ) для каждой частицы:

$$f_1^0 = -120, 16; f_2^0 = -46; f_3^0 = 0, 24,$$

$$f_4^0 = 13, 29; f_5^0 = 22, 64; f_6^0 = 26, 21,$$

$$f_7^0 = 26, 16; f_8^0 = -7, 39; f_9^0 = -30.$$

Установите начальные скорости каждой частицы на ноль:

$$v_1^0 = v_2^0 = v_3^0 = v_4^0 = v_5^0 = v_6^0 = v_7^0 = v_8^0 = v_9^0 = 0.$$

Шаг 2: Номер итерации $t = t + 1 = 0 + 1 = 1$.

Шаг 3: Нахождение лучшего решения для каждой частицы по следующей формуле:

$$P_{best,i}^{t+1} = \begin{cases} P_{best,i}^{t+1} & \text{если } f_i^{t+1} > P_{best,i}^{t+1} \\ x_i^{t+1} & \text{если } f_i^{t+1} \leq P_{best,i}^{t+1} \end{cases}$$

таким образом:

$$\begin{aligned} P_{best,1}^1 &= -9, 6, P_{best,2}^1 = -6, P_{best,3}^1 = -2, 6, \\ P_{best,4}^1 &= -1, 1, P_{best,5}^1 = 0, 6, P_{best,6}^1 = 2, 3, \\ P_{best,6}^1 &= 2, 8, P_{best,7}^1 = 8, 3, P_{best,8}^1 = 10. \end{aligned}$$

Шаг 4: Нахождение лучшего решения среди всех частиц по следующей формуле:

$$G_{best} = \max\{P_{best,i}\},$$

где G_{best} – глобальная позиция частицы, в которой целевая функция достигает своего максимального значения в пространстве решений, в нашем случае $G_{best}=2.3$ где значение ЦФ =26.21,

Шаг 5: Корректировка скорости частицы по следующей формуле:

$$v_i^{t+1} = v_i^t + c_1 r_1 [P_{best,i}^t - x_i^t] + c_2 r_2 [G_{best,i}^t - x_i^t] \quad (3)$$

где r_1, r_2 – случайные значения в интервале $[0, 1]$, c_1, c_2 : коэффициенты ускорения частицы, отражают стремление частицы достигнуть глобально лучшего решения, либо сохранить свое, их общая сумма равна 2.

Учитывая что, $c_1, c_2=1$ и $r_1=0,213, r_2=0,876$

$$\begin{aligned} v_1^1 &= 0 + 0,213(-9, 6 + 9, 6) + 0,876(2, 3 + 9, 6) = 10, 4244, \\ \text{Таким образом: } v_2^1 &= 7, 2708, v_3^1 = 4, 2924, v_4^1 = 2, 9784, v_5^1 = 1, 4892, \\ v_6^1 &= 0, v_7^1 = -0, 4380, v_8^1 = 5, 256, v_9^1 = -6, 7452. \end{aligned}$$

Шаг 5: определение новую позицию частицы по формуле (4), где новая позиция частицы зависит от ее предыдущего позиция и скорости:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1}, \quad (4)$$

где $i=1,2,3,4,5,6,7,8,9$.

Таким образом:

$$\begin{aligned} x_1^1 &= 0, 8244, x_2^1 = 1, 2708, x_3^1 = 1, 6924, \\ x_4^1 &= 1, 8784, x_5^1 = 2, 0892, x_6^1 = 2, 3, \\ x_7^1 &= 2, 362, x_8^1 = 3, 044, x_9^1 = 3, 2548. \end{aligned}$$

Шаг 6: Расчет значения целевой функции для каждой новой частицы:

$$\begin{aligned} f_1^1 &= 23, 4424, f_2^1 = 24, 7391, f_3^1 = 25, 5978, \\ f_4^1 &= 25, 8636, f_5^1 = 26, 0812, f_6^1 = 26, 21, \\ f_7^1 &= 26, 231, f_8^1 = 25, 9541, f_9^1 = 25, 6803. \end{aligned}$$

Шаг 7: На шаге 7 происходит проверка успешности выполнения алгоритма. Выполнение алгоритма считается успешно завершенным, если он сошёлся, т.е. позиция всех частиц совпали.

В случае, если позиция всех частиц не сходятся, то итерации продолжаются $t=t+1$ и все шаги от 3-6 повторяются до тех пор, пока критерий остановки не выполнится.

Заключение

Электроэнергетика в Сирийской Арабской Республике является дефицитной. Растущая потребность в электроэнергии связывается, в том числе с развитием промышленности. В одном из промышленных центров Сирии, городе Латакия, работает порт, имеющий стратегическое значение для страны. Систематические нарушения качества электроэнергии на подстанции, питающий этот порт, приводят к технологическим нарушениям и ущербу. Предлагаемое решение компенсации гармоник в виде установки

активного фильтра позволило уменьшить коэффициент искажения синусоидальной формы кривой тока до допустимых значений: с 10,71% до 1,67%, а коэффициент искажения синусоидальной формы кривой напряжения уменьшить с 12,16% до 2,59%. При выборе емкости активного фильтра, которая составила 8300 мкФ, использовался оптимизационный метод роя частиц.

Литература

1. Nasyrov R., Aljendy R., Kherbek T. Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia-Syria // IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2018. pp.712-718.
2. Geena Sh., Kanchan J. Harmonic Reduction using Shunt Active Power Filter. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. 2016.V. 5, Issue 6.
3. Diab AZ, Selim SA, Elnaghi BE. Particle swarm optimization based vector control of permanent magnet synchronous motor drive // NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus NW), Russia, IEEE Conf. 2016. pp.740-746.
4. Motta L., Faúndes N. Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends // 17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP) 2016. pp.657-662.
5. Ullah A., Ul Hasan Sheikh I., Arshad Sh., et al. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System // 16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST).2019. pp.384-388.
6. Deepak C., Bhonsle, Ramesh B., et al. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. Energy. 2016. V. 115. pp. 830-839.
7. Dash R., Paikray P., Swain SC. Active power filter for harmonic mitigation in a distributed power generation system // Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). 2017. pp. 1-6.
8. Arun Shankar VK, Senthil Kumar N. Implementation of Shunt Active Filter for Harmonic Compensation in a 3 Phase 3 Wire Distribution Network // Energy Procedia. 2017. V. 117.pp.172-179.
9. Jadhav PP., Patil AS. Reduce harmonics using PI controller in d-q reference frame for active power filter // International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC). 2016. pp.653-656.
10. Liu C., Yuqing He., Ke Dai. Industrial power distribution system harmonic resonance problem and solution with shunt active power filter // 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. 2017. pp.1243-1248.
11. Moussa H., Martin Jean-Ph., Pierfederici S., et al.Voltage harmonic distortion compensation with non-linear load power sharing in low-voltage islanded microgrid // Mathematics and Computers in Simulation. 2019. V. 158. pp. 32-48.
12. Gaurava DS., Rajendrakumar DK. Design, simulation and analysis of Shunt Active Power Filter using instantaneous reactive power topology // International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE), 2017.
13. Vijayakumar G, Nitin G, Gupta R. Improved dynamic performance of shunt active power filter using particle swarm optimization // IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS), 2017.
14. Nasyrov R., Aljendy R., Diab A. Zaki. Adaptive PI controller of active power filter for compensation of harmonics and voltage fluctuation based on particle swarm optimization (PSO) // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 2018 IEEE Conference of Russian. 2018. pp. 719-724.
15. Nasyrov R., Aljendy R. Comprehensive comparison between hybrid fuzzy-PI and PSO-PI controllers based active power filter for compensation of harmonics and reactive power under different load conditions // Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 2018 IEEE Conference of Russian. 2018. pp. 725-730.
16. Xiaoyue Z., Xinyan Zh. Artificial Intelligence Applications in Power System // 2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering. 2016. pp.158-161.
17. Wu Cao., Mumu Wu., Jianfeng Zh., et al. An improved current-limiting strategy for shunt active power filter (SAPF) using particle swarm optimization (PSO) // IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). 2018. pp.494-498.
18. Yonggang Ch., Lixiang Li., Haipeng P., et al. Particle swarm optimizer with two differential mutation // Applied Soft Computing. 2017. V.61. pp. 314-330.
19. Yonggang Ch, Lixiang Li, Haipeng P, et al. Dynamic multi-swarm differential learning particle swarm optimizer. Swarm and Evolutionary Computation. 2018.V.39. pp. 209-221.
20. Kwang Y. Lee and Jong-Bae P, Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem Advantages and Disadvantages // IEEE, 2010.

Авторы публикации

Насыров Ринат Ришатович – канд.техн.наук. доцент, кафедры «Электроэнергетические системы», НИУ Московский энергетический институт.

Альдженди Расил – аспирант, НИУ Московский энергетический институт.

Хербек Тарэк – канд. техн. наук, профессор, кафедры электроэнергетических систем, Тишинский университет, Латакия, Сирия.

References

1. Nasyrov R, Aljendy R, Kherbek T. Study and analysis of power quality situation in electrical power network. Case study: Lattakia-Syria. *IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)*. 2018. pp.712-718.
2. Geena ShKanchan, J. Harmonic Reduction using Shunt Active Power Filter. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*. 2016;5(6).
3. Diab AZ, Selim SA, Elnaghi BE. Particle swarm optimization based vector control of permanent magnet synchronous motor drive. *NW Russia Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference (EIConRus NW), Russia, IEEE Conf 2016*. pp. 740-746.
4. Motta L, Faúndes N. Active / passive harmonic filters: Applications, challenges & trends. *17th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*. 2016. pp.657-662.
5. Ullah A, Ul Hasan Sheikh I, Arshad Sh, Saleem F. Digital Active Power Filter Controller Design for Current Harmonics in Power System. *16th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST)*. 2019. pp.384-388.
6. Deepak C. Bhonsle, Ramesh, et al. Analyzing power quality issues in electric arc furnace by modeling. *Energy*. 2016;115:830-839.
7. Dash R, Paikray P, Swain S. C. Active power filter for harmonic mitigation in a distributed power generation system. *Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT)*. 2017. pp. 1-6.
8. Arun Shankar V.K, Senthil Kumar N. Implementation of Shunt Active Filter for Harmonic Compensation in a 3 Phase 3 Wire Distribution Network. *Energy Procedia*. 2017;117:172-179.
9. Jadhav PP, Patil AS. Reduce harmonics using PI controller in d-q reference frame for active power filter. *International Conference on Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication (ICGTSPICC)*. 2016. pp.653-656.
10. Liu C, Yuqing He, Ke Dai, et al. Industrial power distribution system harmonic resonance problem and solution with shunt active power filter. *43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*. 2017. pp.1243-1248.
11. Moussa H, Martin Jean-Ph, Pierfederici S, et al. Voltage harmonic distortion compensation with non-linear load power sharing in low-voltage islanded microgrid. *Mathematics and Computers in Simulation*. 2019;158:32-48.
12. Gaurava DS, Rajendrakumar DK. Design, simulation and analysis of Shunt Active Power Filter using instantaneous reactive power topology. *International Conference on Nascent Technologies in Engineering (ICNTE)*, 2017.
13. Vijayakumar G, Nitin G, Gupta R. Improved dynamic performance of shunt active power filter using particle swarm optimization. *IEEE International Conference on Intelligent Techniques in Control, Optimization and Signal Processing (INCOS)*, 2017.
14. Nasyrov.R, Aljendy R, Diab A. Zaki. Adaptive PI controller of active power filter for compensation of harmonics and voltage fluctuation based on particle swarm optimization (PSO). *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 2018 IEEE Conference of Russian*. 2018. pp. 719-72.
15. Nasyrov.R, Aljendy R. Comprehensive comparison between hybrid fuzzy-PI and PSO-PI controllers based active power filter for compensation of harmonics and reactive power under different load conditions. *Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus) 2018 IEEE Conference of Russian*. 2018. pp. 725-730.
16. Xiaoyue Z, Xinyan Zh. Artificial Intelligence Applications in Power System. *2nd International Conference on Artificial Intelligence and Industrial Engineering*. 2016. pp.158-161.
17. Wu Cao, Mumu Wu, Jianfeng Zh, et al. An improved current-limiting strategy for shunt active power filter (SAPF) using particle swarm optimization (PSO). *IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. 2018. pp.494-498.
18. Yonggang Ch, Lixiang Li, Haipeng P, et al. Particle swarm optimizer with two differential mutation. *Applied Soft Computing*. 2017. V.61. pp.314-330.

19. Yonggang Ch, Lixiang Li, Haipeng P, et al. Dynamic multi-swarm differential learning particle swarm optimizer. *Swarm and Evolutionary Computation*. 2018. V.39. pp. 209-221.

20. Kwang Y. Lee and Jong-Bae P. *Application of Particle Swarm Optimization to Economic Dispatch Problem Advantages and Disadvantages*. IEEE, 2010.

Authors of the publication

Rinat R. NasYROV – National research University "Moscow power engineering Institute» Moscow, Russia.
Email: nasirov.rinat@gmail.com.

Raseel Aljendy – National research University "Moscow power engineering Institute», Moscow, Russia.
Email: aljendy_raseel@yahoo.com.

Tarek Kherbek – Tishreen University, Latakia, Syria. Email: dr.tarek.kherbek@gmail.com.

Поступила в редакцию

10 июля 2019г.