

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова»

**ДИНАМИКА
НЕЛИНЕЙНЫХ
ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ
И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

**Материалы
XIII Всероссийской научно-технической
конференции**

ДНДС–2019

ЧЕБОКСАРЫ

2019

УДК 681.511.42.033(082)

Д44

Редакционная коллегия:

ректор А.Ю. Александров,
д-р техн. наук, профессор Г.А. Белов,
канд. техн. наук, доцент А.В. Серебрянников

*Печатается по решению Ученого совета
Чувашского государственного университета имени И.Н. Ульянова*

Динамика нелинейных дискретных электротехнических
Д44 и электронных систем: материалы 13-й Всерос. науч.-техн.
конф. Чебоксары: Изд-во Чуваш. ун-та, 2019. 478 с.

ISBN 978-5-7677-2925-8

Рассматриваются вопросы математических основ и математического моделирования нелинейных дискретных систем, цифровой обработки сигналов, построения и анализа устройств и систем силовой электроники, систем электроэнергетики и электропривода.

Для научных работников, инженеров, менеджеров и студентов старших курсов.

УДК 681.511.42.033(082)

© Издательство

ISBN 978-5-7677-2925-8

Чувашского университета, 2019

По основным своим характеристикам технологический коэрцитиметр ТКМГП не уступает оборудованию зарубежных фирм. Он используется для входного контроля гистерезисных параметров высококоэрцитивных магнитотвёрдых материалов, использующихся в производстве.

Литература

1. *Нестерин В.А.* Оборудование для импульсного намагничивания и контроля постоянных магнитов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 88 с.

2. Патент на полезную модель № 185424. Технологический коэрцитиметр магнитных гистерезисных параметров / В.С. Генин, А.Д. Пантеев, В.А. Нестерин, А.В. Нестерин.

Фёдоров А-р.О., Солдатов А.В., Петров В.С.
(Чебоксары, ООО НПП «ЭКРА»)

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ВЫХОДНОГО ФИЛЬТРА СОЛНЕЧНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Коммутация IGBT-модулей полупроводниковых преобразователей мощности, предназначенных для подключения солнечных электростанций к энергосистеме (рис. 1), приводит к появлению высших гармоник в примыкающей сети. Вместе с тем близость расположения СЭС к потребителям требует уделения особого внимания к выполнению норм по качеству электрической энергии. В связи с тем, что они неблагоприятно воздействуют на электрооборудование, для их подавления применяются специальные фильтры [1].

За рубежом наиболее широкое распространение получили фильтры типа *LCL* (рис. 1) [2, 3]. Они обладают хорошими подавляющими свойствами, малыми габаритами и низкой стоимостью. В настоящей работе рассмотрен выбор параметров такого фильтра с пассивным демпфированием, получившего широкое распространение.

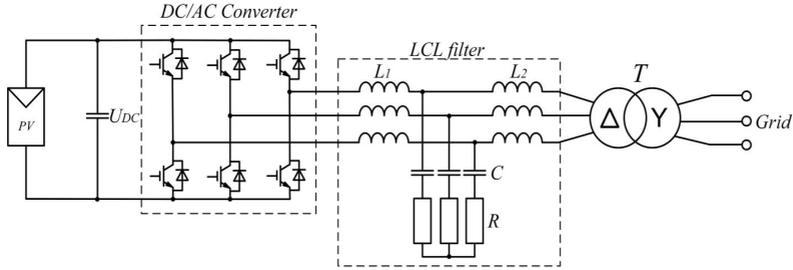


Рис. 1. Схема подключения СЭС к сети: *PV* – солнечные панели; *DC/AC Converter* – инвертор; *LCL filter* – выходной фильтр; *T* – силовой трансформатор; *Grid* – электрическая сеть

Определение параметров фильтра. Для обеспечения коэффициента мощности, близкого к единице [5], реактивная мощность фильтра, как правило, ограничивается 5–10 % номинальной мощности инвертора $S_{\text{инв.ном}}$ [6]:

$$Q_c = k_s S_{\text{инв.ном}}, \quad (1)$$

где $k_s = 0,05 \dots 0,1$.

Поскольку реактивная мощность фильтра:

$$Q_c = 2\pi f_{\text{ном}} C U_{\text{ном}}^2,$$

то с учетом (1) ёмкость фильтра

$$C = \frac{k_s S_{\text{инв.ном}}}{2\pi f_{\text{ном}} U_{\text{ном}}^2}, \quad (2)$$

где $f_{\text{ном}}$ – номинальная частота электрической сети, Гц; $U_{\text{ном}}$ – действующее значение линейного напряжения на выходе инвертора, В.

Пульсация выходного тока инвертора зависит от индуктивности фильтра с его стороны [7]:

$$\Delta I_{L_{\text{max}}} = \frac{2U_{DC}(1-m)m}{3f_{sw}L_1}, \quad (3)$$

где U_{DC} – номинальное напряжение со стороны постоянного тока инвертора, В; L_1 – индуктивность фильтра со стороны инвертора, Гн; f_{sw} – частота коммутаций инвертора, Гц; m – коэффициент модуляции инвертора.

Пульсацию выходного тока инвертора принято ограничивать в пределах 10–25 % от номинального тока инвертора $I_{\text{инв.ном}}$ [7]:

$$DI_{L_{\max}} = k_r I_{\text{инв.ном}}, \quad (4)$$

где $k_r = 0,1, 0,25$;

$$I_{\text{инв.ном}} = \frac{S_{\text{инв.ном}}}{\sqrt{3}U_{\text{ном}}}.$$

Тогда с учетом (3) и (4) индуктивность фильтра со стороны инвертора:

$$L_1 = \frac{2U_{DC}(1-m)m}{3f_{sw}k_r I_{\text{ном}}}. \quad (5)$$

Индуктивность со стороны сети определяется по условию обеспечения затухания пульсаций тока инвертора. Для этого строят график зависимости коэффициента затухания k_a от отношения k_l суммы индуктивностей фильтра со стороны сети и трансформатора [8] к индуктивности фильтра со стороны инвертора

$$k_l = \frac{L_2 + L_t}{L_1}; \quad k_a = \frac{1}{\left|1 + k_l \left(1 - L_1 C (2pf_{sw})^2\right)\right|}.$$

При этом L_1 выбирается таким, чтобы $k_a = 0,1, 0,25$.

Для обеспечения необходимого уровня напряжения на выходе СЭС падение напряжения на индуктивностях фильтра не должно превышать 5–10 % номинального напряжения $U_{\text{ном}}$ [5]

$$DU_{L_1} + DU_{L_2} \leq k_{Du} U_{\text{ном}},$$

где DU_{L_1}, DU_{L_2} – падение напряжения на L_1 и L_2 ; $k_{Du} = 0,05, 0,1$.

То есть

$$L_1 + L_2 \leq k_{Du} L_{\sigma},$$

где $L_{\sigma} = \frac{U_{\text{ном}}^2}{2p f_{\text{ном}} S_{\text{инв.ном}}}$ – базисная индуктивность.

Сопротивление демпфирующего резистора, как правило, выбирается равным одной трети от ёмкостного сопротивления фильтра на резонансной частоте f_{res} [9]

$$R = \frac{1}{3(2pf_{res})C}, \quad (6)$$

где резонансная частота

$$f_{res} = \frac{1}{2\rho} \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_t}{L_1(L_2 + L_t)C}}.$$

Для предотвращения резонанса резонансная частота фильтра обычно отстраивается от номинальной частоты сети f_0 и частоты коммутаций инвертора f_{sw} [9]:

$$10f_0 \leq f_{res} \leq 0,5f_{sw}.$$

Фильтр с выбранными параметрами должен обеспечивать качество электрической энергии на СЭС, проверка которого осуществляется путем расчета суммарного коэффициента гармонических составляющих тока:

$$THD_i = 2\rho f_{ном} (L_1 + L_2 + L_t) \frac{\sqrt{2NMS(m)}}{mL_1(L_2 + L_t)Cf_{sw}^3} 100,$$

где $NMS(m) = \frac{1}{60480} m^2 + \frac{77}{8} m^4 + \frac{35}{24} m^6 - \frac{384}{35\rho} m^7 + \frac{245}{144} m^8 \frac{\ddot{\sigma}}{\sigma}$

THD_i должен быть не более 5 % [5].

Пример. Исходные данные:

- номинальная мощность инвертора: $S_{инв.ном} = 250$ кВА;
- напряжение на выходе инвертора: $U_{ном} = 250$ В;
- номинальное напряжение со стороны постоянного тока инвертора: $U_{DC} = 480$ В;
- частота коммутации инвертора: $f_{sw} = 5000$ Гц;
- номинальная частота сети: $f_{ном} = 50$ Гц;
- индуктивность трансформатора: $L_t = 48$ мкГн;
- коэффициент модуляции инвертора: $m = 0,85$;
- отношение реактивной мощности фильтра к полной мощности инвертора: $k_s = 0,05$;
- отношение пульсации тока к номинальному току инвертора: $k_r = 0,2$.

Из (2) и (5) следует $C = 640$ мкФ, $L_1 = 70$ мкГн. Из (6) получаем $R = 0,074$ Ом.

При $k_a = 0,03$ $k_l = 0,8$. Следовательно, $L_2 = 8,8$ мкГн.

Оценка эффективности фильтра. Для оценки эффективности фильтра была разработана математическая модель солнечной электростанции (рис. 2).

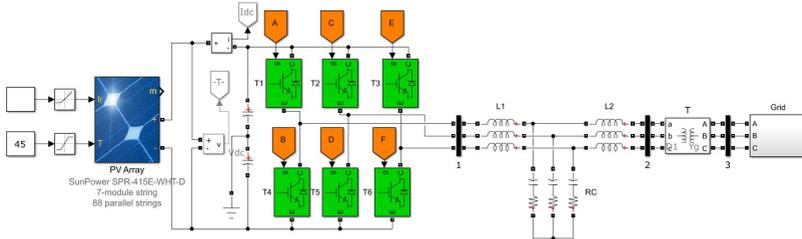


Рис. 2. Математическая модель СЭС

Кривая тока на входе фильтра искажена из-за присутствия высокочастотных гармоник (рис. 3), которые в основном сосредоточены на частотах, кратных частоте коммутации ключей инвертора (рис. 4). Суммарный коэффициент гармонических составляющих тока $THD_i = 16,12\%$, что не удовлетворяет требованиям ГОСТ Р МЭК 61727-2016 (THD должен быть меньше 5%).

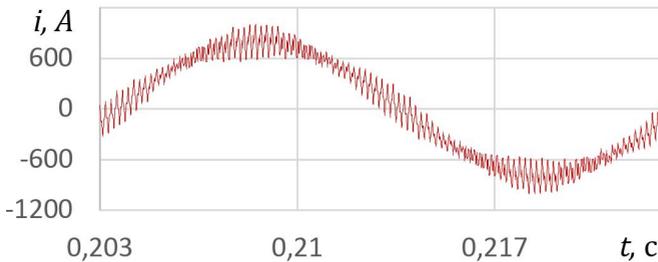


Рис. 3. Ток на входе фильтра

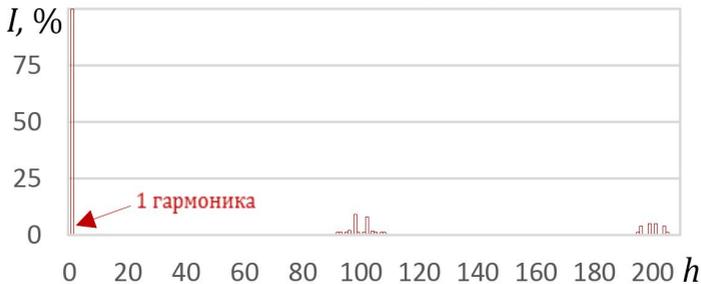


Рис. 4. Гармонический состав тока на входе фильтра (h – номер гармоники)

Применение фильтра заметно снизило уровень гармонических составляющих (рис. 5 и 6).

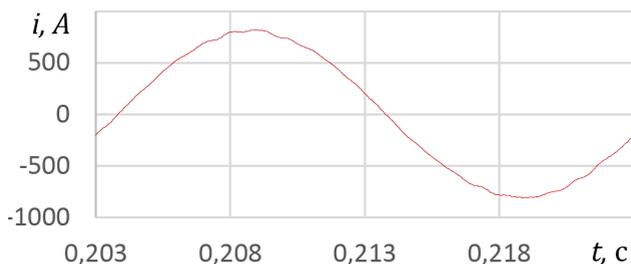


Рис. 5. Ток на выходе фильтра

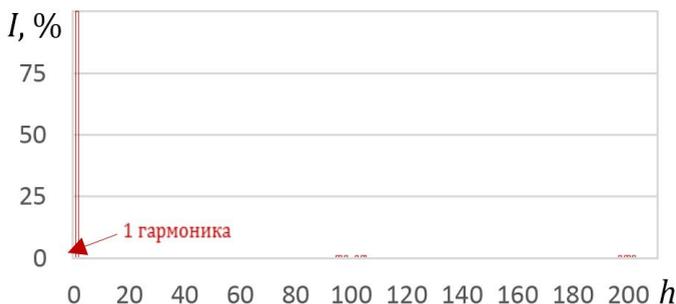


Рис. 6. Гармонический состав тока на выходе фильтра (h – номер гармоники)

На выходе СЭС суммарный коэффициент гармонических составляющих тока $THD_i = 1,27\%$, что удовлетворяет требованиям ГОСТ Р МЭК 61727-2016.

Заключение. Предложенная в работе методика, позволяет выбрать параметры фильтра, устанавливаемого на выходе инвертора солнечной электрической станции и обеспечивающего требуемое качество электрической энергии.

Литература

1. Исмагилов Ф.Р. и др. Исследование параллельной работы солнечной электростанции с сетью // Вестник УГАТУ. – 2016. – № 4 (74). – С. 71–79.

2. *Cha Hanju, Vu Trung-Kien*. Comparative analysis of low-pass output filter for single-phase grid-connected Photovoltaic inverter // Twenty-fifth annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC). – Palm Springs, 2010.

3. *Wang T.C.Y., Ye Zhihong, Sinha Gautam, Yuan Xiaoming*. Output filter design for a grid-interconnected three-phase inverter // IEEE 34th Annual conference on power electronics specialist. – Acapulco, 2003.

4. *Wessels C., Dannehl J., Fuchs F.W.* Active damping of LCL-filter resonance based on virtual resistor for PWM rectifiers – stability analysis with different filter parameters // PESC Record – IEEE annual power electronics specialists conference. – USA, 2008.

5. ГОСТ Р МЭК 61727-2016. Системы фотоэлектрические. Подключение к распределительным электрическим сетям. – М.: ФГУП «Стандартинформ», 2016. – 15 с.

6. *Juntunen R*. LCL filter designs for parallel-connected grid inverters: Thesis for the degree of Doctor of Science: Ramio Juntunen. – Lappeenranta, 2018. – 261 p.

7. *Loncarski J*. Peak-to-peak output current ripple analysis in multiphase and multilevel inverters: PhD in Electrical Engineering: Jelena Loncarski. – Bologna, 2014. – 152 p.

8. *Araujo S*. LCL filter design for grid-connected NPC inverters in offshore wind turbines // The 7th International conference on power electronics. – Daegu, 2007.

9. *Reznik A*. Analysis and design of a smart-inverter for renewable energy interconnection to the grid: Thesis for the degree of Master of Science. – Golden, 2013. – 143 p.

10. *Ruderman A*. Calculation of current total harmonic distortion for a three-phase two-level inverter with LCL-filter // 19th International conference on electrical drives and power electronics. – Dubrovnik, 2017.

<i>Малышкин С.Б., Генин В.С.</i> Оценка влияния фазы напряжения на время выявления КЗ на модели судовой ЭЭС.....	235
<i>Нестерин В.А., Генин В.С., Нестерин А.В.</i> Установка для контроля гистерезисных параметров высокоэнергетических магнитотвёрдых материалов на образцах постоянных магнитов в разомкнутой магнитной цепи.....	238
<i>Фёдоров А-р.О., Солдатов А.В., Петров В.С.</i> Оценка эффективности выходного фильтра солнечной электростанции	240
<i>Denisov E.S., Demidov A.M., Afonina E.V.</i> IoT based solar panel monitoring and control system.....	247
<i>Беспалов Н.Н., Евишев А.В., Кондрашин Д.С.</i> Исследование относительной погрешности измерения обратного тока силового диода в состоянии низкой проводимости.....	249
<i>Беспалов Н.Н., Горячкин Ю.В., Дёмкин П.М., Панькин К.Ю.</i> Особенности вольт-амперной характеристики силового диода при воздействии ударного тока с учётом диффузионной ёмкости.....	255
<i>Беспалов Н.Н., Мясин В.Г.</i> Метод определения теплового сопротивления биполярных транзисторов с изолированным затвором.....	259
<i>Беспалов Н.Н., Горячкин Ю.В., Панькин К.Ю., Дёмкин П.М.</i> Исследование стартовых тепловых режимов работы силовых полупроводниковых приборов при различных начальных значениях температуры	262
<i>Беспалов Н.Н., Зорькин А.В.</i> Оценка значений сопротивлений катодных шунтов силовых тиристоров по вольтамперной характеристике цепи управления	266
<i>Жарницкий В.Я., Андреев Е.В., Зайцев Ю.В., Рыбаков Д.А.</i> Датчик температуры на полиэтилене с техническим углеродом.....	272
<i>Шульгин Д.А., Узенбаева С.А.</i> Яркие светодиоды на основе металлоорганических галогенидных перовскитных нанопластинок.....	277

Научное издание

**ДИНАМИКА НЕЛИНЕЙНЫХ ДИСКРЕТНЫХ
ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ**

Материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции

Публикуются в авторской редакции
Отв. за выпуск А.В. Серебрянников

Согласно Закону № 436-ФЗ от 29 октября 2010 года
данная продукция не подлежит маркировке

Подписано в печать 04.06.19. Формат 60×84/16.
Бумага писчая. Печать офсетная. Гарнитура Times.
Усл. печ. л. 27,7. Уч.-изд. л. 26,5. Тираж 300 экз. Заказ 696.

Издательство Чувашского университета
Типография университета
428015 Чебоксары, Московский просп., 15