

На правах рукописи

Ahmed Refaat

Махмуд Ахмед Рефаат Абуэльфадл

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СУММИРОВАНИЯ
ТОКА ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ**

Специальность 05.09.05 – Теоретическая электротехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2020 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на кафедре «Теоретическая электротехника и электромеханика»

Научный руководитель: **Коровкин Николай Владимирович**

доктор технических наук, профессор высшей школы «Высоковольтная энергетика» Института энергетики ФГАОУ ВО СПбПУ, г. Санкт-Петербург.

Официальные оппоненты: **Смоловик Сергей Владимирович**

Доктор технических наук, профессор, заместитель заведующего отделом проектирования и развития энергосистем, АО «Научно-технический центр Единой энергосистемы – Противоаварийное управление», г. Санкт-Петербург.

Беляев Николай Александрович

Кандидат технических наук, Акционерное общество «Инспекция по контролю технического состояния объектов электроэнергетики» (АО «Техническая инспекция ЕЭС»), начальник службы мониторинга и анализа схем и программ перспективного развития электроэнергетики. г. Москва.

Ведущая организация:

Открытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения». г. Санкт-Петербург.

Защита состоится 29 января 2021 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета У.05.09.05 при Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29, Главный учебный корпус, ауд. 284.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте www.spbstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г

Ученый секретарь

Диссертационного совета У.05.09.05,

д.т.н., доцент



Калимов Александр Гелиевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования и степень проработанности. В последние десятилетия проблемы нехватки энергии и загрязнения окружающей среды стали важнейшими темами исследований во всем мире. Поэтому использование систем возобновляемой энергии для выработки электроэнергии и снижения выбросов углерода привлекает все большее внимание. Среди различных технологий использования возобновляемых источников энергии солнечные фотоэлектрические (PV) системы быстро растут на рынках электроэнергии (как ожидается, эта тенденция сохранится в ближайшем будущем) будучи более экологически чистыми энергетическими ресурсами, чем традиционные, такие как ископаемое топливо или атомная энергия. Тем не менее, удельная стоимость энергии, получаемой из фотоэлектрических систем, по-прежнему высока по сравнению с традиционными источниками энергии и другими видами возобновляемых источников энергии; соответственно, одна из целей этой работы заключается в снижении затрат, связанных с фотоэлектрическими системами, путем повышения эффективности производства энергии.

Централизованная архитектура инвертора является наиболее часто используемой технологией для крупных фотоэлектрических установок, подключенных к сети, благодаря высокой эффективности преобразования и низкому отношению цены к мощности. Однако мощность, преобразуемая обычным центральным инвертором с топологией последовательно-параллельных (SP) массивов, значительно снижается в условиях частичного затенения PV панелей. Еще одной проблемой использования центрального инвертора является отсутствие операции достижения максимальной точки мощности (MPPT) для каждого модуля в условиях частичного затенения. Обходные диоды, которые используются для предотвращения эффекта горячих точек модулей, деформируют характеристики массива PV, которые демонстрируют множество пиков, включая глобальный MPPT и локальные MPPT, что затрудняет отслеживание глобального MPPT с использованием простого алгоритма отслеживания. Кроме того, во время частичного затенения трекер MPPT может следовать за локальным пиком вместо глобального пика, что приводит к потерям мощности, которые могут возникнуть при неверном определении точки MPPT.

Еще одна проблема использования центрального инвертора с SP-массивом заключается в том, что выходная мощность существенно снижается в условиях неравномерного старения PV панелей. Неравномерное старение фотоэлектрических панелей является распространенной проблемой на заводах по производству PV панелей, поскольку они часто работают в суровых условиях окружающей среды в течение длительного периода эксплуатации. Из-за высокой цены на замену PV панелей на новые предпочтительно повысить мощность, получаемую от старых фотоэлектрических систем. Следовательно, необходимо разрабатывать технологии фотоэлектрических систем для неоднородных устаревших фотоэлектрических массивов, чтобы продлить срок их службы и максимально повысить эффективность производства энергии.

Качество передаваемой в сеть мощности является еще одной важной особенностью фотоэлектрической системы, подключенной к сети. Качество вводимой мощности в основном определяется практикой и стандартами по напряжению, частоте и гармоникам. В этой диссертации стандарт IEEE 929 будет использоваться для достижения этой цели.

Цель работы. Целью работы является разработка методов использования централизованного инвертора для снижения потерь мощности на фотоэлектрических электростанциях в условиях частичного затенения, максимизации мощности, генерируемой неоднородными устаревшими

фотоэлектрическими матрицами, и подачи высококачественной энергии в сеть для реализации стандарта IEEE 929.

Для достижения поставленной цели решались следующие научные задачи:

1. Изучить влияние частичного затенения на эффективность централизованной инверторной технологии с топологией последовательно-параллельных (SP) массивов и выполнить обзор литературы предыдущих исследований по минимизации частичных потерь затенения.
2. Классифицировать потери мощности в условиях неравномерного старения фотоэлектрической матрицы и выполнить обзор предыдущих работ, рассматривающих уменьшение этих потерь.
3. Изучить стандарты и требования, касающиеся подключения фотоэлектрических систем к сети.
4. Предложить новую топологию для централизованного инвертора, создать математические модели этой системы и выполнить моделирование процессов в предложенной системе.
5. Провести анализ и обсуждение полученных результатов в условиях частичного затенения и провести сравнение новых результатов с традиционной топологией массива SP, чтобы показать эффективность предложенного подхода.
6. Провести анализ и обсуждение полученных результатов в условиях неравномерного старения фотоэлектрических модулей.
7. Предложить методологию управления для новой схемой отбора мощности для параллельной работы с трехфазными сетями.
8. Исследовать эффективности методологии контроля для приложений, связанных с сетью.

Научная новизна работы соискателя заключается в том, что:

1. Создана новая схема отбора мощности с центральным инвертором, подключенным к сети, на основе нового сумматора тока (ССО), повышающая выходную мощность от фотоэлектрической матрицы в условиях частичного затенения.
2. Предложены подходы к реконфигурации устаревших фотоэлектрических модулей для решения проблемы неравномерного старения между последовательно соединенными фотоэлектрическими модулями без замены устаревших модулей новыми. Впервые процесс старения оценивается на основе степени ухудшения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода одновременно.
3. Создана методология управления ССО, подключенного к сети, удовлетворяющая стандарту IEEE 929.

Теоретическая значимость. Разработана и смоделирована на MATLAB/SIMULINK новая структура инвертора, основанная на сумматоре тока, повышающая эффективность солнечной электростанции в условиях частичного затенения. Работа сумматора тока протестирована совместно с подходами реконфигурации SP, для максимизации мощности, извлекаемой из неоднородных устаревших фотоэлектрических модулей, а также созданы программы моделирования работы нового сумматора тока с сетью.

Практическая значимость работы. Результаты работы могут быть использованы для разработки крупномасштабных фотоэлектрических электростанций, подключенных к сети, чтобы продлить срок их службы и максимально повысить эффективность производства энергии при частичном затенении или неравномерном старении фотоэлектрических пластин.

Методология и методы исследования. Основные методы исследования, используемые в работе: математическое и компьютерное моделирование, сравнительный анализ, алгоритмы работы систем управления. Для решения поставленных задач использован программный комплекс MATLAB (версия R2015a). Силовые схем и элементы систем управления моделируются с использованием SIMULINK, а алгоритмы пишутся с использованием М-кода.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что мощность, вырабатываемая с помощью традиционной структуры централизованного инвертора с массивом SP, резко снижается в неидеальных условиях из-за несоответствия между фотоэлектрическими панелями. Основными причинами этого несоответствия являются частичное затенение и неоднородные условия старения фотоэлектрических модулей. При обоих условиях характеристики всего массива фотоэлектрических элементов деформируются и демонстрируют множество пиков, включая глобальный и локальные MPP. Поэтому извлечение максимальной мощности из массива становится сложным, поскольку существуют различные локальные MPP. Следовательно, классические алгоритмы MPPT, которые отслеживают единый MPP характеристик массива PV в идеальных условиях, не могут быть применены. В условиях несоответствия трекер MPP может следовать за локальным пиком вместо глобального пика, который представляет глобальный MPP (GMPP), что приводит к потерям мощности.
2. Предложена новая структура схемы отбора мощности, основанная на ССО, обеспечивающая увеличение мощности, извлекаемой из фотоэлектрической матрицы в условиях частичного затенения и неравномерного старения.
3. Показано, что, благодаря использованию ССО, электрические характеристики массива PV улучшаются и становятся унимодальными, что позволяет использовать простой алгоритм MPPT. Локальные MPP, имеющие место в случае топологии массива SP, успешно устраняются путем использования ССО. Структура с ССО не страдает от потерь мощности, которые могут возникнуть при неверном определении точки MPP. Кроме того, различия в напряжении между параллельными PV панелями из-за частичного затенения или неравномерного старения условия компенсируются. Следовательно, циркуляционные токи между параллельными фотоэлектрическими генераторами исключаются.
4. Подтверждено многочисленными расчетами, что в условиях частичного затенения PV панелей потери мощности существенно снижаются, а также повышается энергоэффективность всей станции за счет использования ССО.
5. Показано, что проблема неравномерного старения последовательно соединенных фотоэлектрических модулей решается без замены устаревших модулей новыми. Оптимальная мощность достигается, с использованием тока короткого замыкания для оценки процесса старения, тогда как близкая к оптимальной мощность достигается, когда и ток короткого замыкания, и напряжение холостого хода используются для оценки процесса старения.
6. Предложена методология и схемы управления трехфазным ССО, подключенным к сети, с тем чтобы отдавать в сеть электроэнергию, соответствующую стандарту IEEE 929. Показано, что предложенная методология управления обеспечивает отличный установившийся отклик, быстрый динамический отклик, низкий коэффициент нелинейных искажений тока, работу с единичным коэффициентом мощности, идеальное и надежное отслеживание MPP.

Степень достоверности результатов подтверждается использованием хорошо изученных, законов Кирхгофа;

производством расчетов в качественном программном инструменте MATLAB/SIMULINK, проверенного многолетней успешной практикой расчетов. Корректным использованием современных методов математической обработки данных.

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на: кафедральных научных семинарах СПбПУ, XX международной научной конференции «Энергетический менеджмент муниципальных объектов и технологии устойчивой энергетики» («Energy Management of Municipal Facilities and Sustainable Energy Technologies EMMFT 2018», (Воронеж, 10–13 декабря 2018), 19-ая Конференция молодых исследователей в области электротехники и электроники «2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2019 ElConRus)», (Санкт-Петербург, 28 – 31 Января 2019), Международная научная электроэнергетическая конференция «International Scientific Electric Power Conference (ISEPC-2019)», (Санкт-Петербург, 23 – 24 мая 2019), Международная научная конференция «Construction and Architecture: Theory and Practice for the Innovation Development (CAAPID-2019)», (Кисловодск, 1-5 октября 2019), «Международная мультидисциплинарная конференция по промышленно-му инжинирингу и современным технологиям» «2020 International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon)», (Владивосток, остров Русский, 6 – 9 октября 2020).

Публикации. Основное содержание диссертации были опубликованы в 12 печатных трудах, в том числе: десять статей в журналах и конференциях, входящих в международные системы цитирования (Scopus, Web of Science); две статьи - в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертация содержит введение, 5 глав, изложена на 146 страницах, имеет 10 таблиц, 77 рисунок, список литературы из 132 наименования и приложение на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** представлена актуальность работы, показаны цель и задачи исследования, выделены научная новизна, методология и методы исследования, практическая значимость результатов исследования, перечислены основные научные положения, представленные к защите.

В **главе 1** обсуждаются глобальные тенденции в области возобновляемых источников энергии, будущее видение возобновляемых источников энергии в Египте и проблемы, с которыми сталкиваются централизованные инверторные фотоэлектрические системы.

В **главе 2** представлен обзор фотоэлектрических станций, включая математическое моделирование фотоэлектрических генераторов, классификацию фотоэлектрических систем, топологию блоков питания (PCU), методы извлечения максимальной мощности из фотоэлектрических генераторов, инверторы напряжения (VSI), технику синусоидальной широтно-импульсной модуляции (SPWM), требования и стандарты для фотоэлектрических систем, подключенных к сети.

В **Главе 3** рассматривается применение сумматора тока для смягчения эффекта частичного затенения. В первой части главы 3 обсуждается влияние частичного затенения на эффективность централизованного инвертора с топологией последовательно-параллельных (SP) массивов. Вторая часть главы 3 содержит обзор предыдущих работ, использованных для минимизации потерь затенения.

В третьей части главы 3 предложено использование сумматора тока, для повышения мощности, извлекаемой из фотоэлектрической матрицы в условиях частичного затенения. Схема ССО (впервые предложено в Антонов Б.М., Лабунцов В.А., Ласкин В.В., «Система нагружения многоэлектродного магнетогидродинамического генератора», Патент: N 738044, Н 02 J 1/10, 1976) показана на рисунке 1. Как видно, каждые восемь модулей или подстрок подключаются к ССО как один стек, а затем эти стеки могут быть соединены последовательно-параллельно к сети через инвертор. ССО используются для улучшения отбора энергии от фотоэлектрической матрицы вместо использования обходных и блокирующих диодов, которые искажают характеристики фотоэлектрической матрицы и уменьшают ее выходную мощность. Основными функциями ССО являются сбор тока от фотоэлектрических модулей при напряжениях, близких к максимальным точкам питания (МРР), и обеспечение плавных выходных характеристик с одним МРР для инвертора. В то время как функции инвертора состоят в том, чтобы преобразовать мощность постоянного тока в мощность переменного тока и одновременно отслеживать точку максимальной мощности.

Принципиальная электрическая схема ССО показана на рисунке 2. Эта схема представляет собой модифицированную схему, которая используется для сбора тока от электродов магнетогидродинамического генератора, которые имеют различные напряжения. Как показано на рисунке 2, все отрицательные клеммы фотоэлектрических генераторов соединены с общей отрицательной шиной, в то время как каждая положительная клемма соединена с тиристорным мостом, а затем все мосты собраны на общую положительную шину.

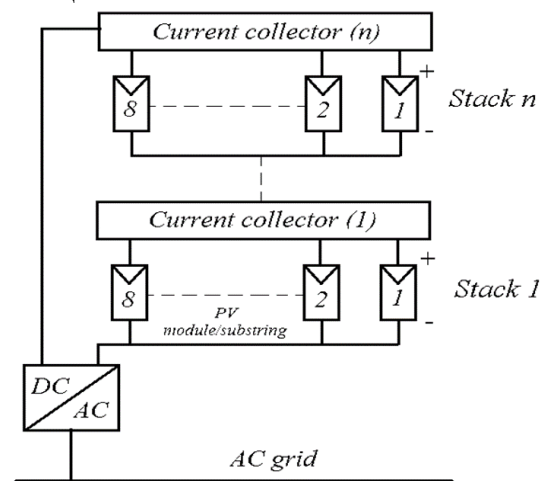


Рисунок 1 – Принципиальная схема топологии ССО

Мосты соединены друг с другом через восемь конденсаторов ($C_1 - C_8$) и трансформаторы ($T_{r1} - T_{r8}$), которые действуют как цепь самокоммутации и компенсируют разницу напряжения между параллельными PV панелями. Мостовые тиристоры управляются таким образом, чтобы в первом полупериоде два диагонально противоположных тиристора T_1 & T_4 были смещены в прямом направлении, в то время как два других тиристора T_2 & T_3 смещены в обратном направлении, и наоборот, во втором полупериоде. Следовательно, верхний и нижний конденсаторы между соседними фотоэлектрическими генераторами поочередно меняют свою полярность через каждый полупериод. Принудительная коммутация тириستоров осуществляется при разряде конденсаторов связи. На рисунке 3 показаны формы сигналов напряжения на конденсаторах и соответствующие формы сигналов тока и напряжения SCR во время установившейся работы ССО. Как можно видеть, указанные SCR в формах напряжения конденсаторов связи являются включенными, где T - длительность полного цикла.

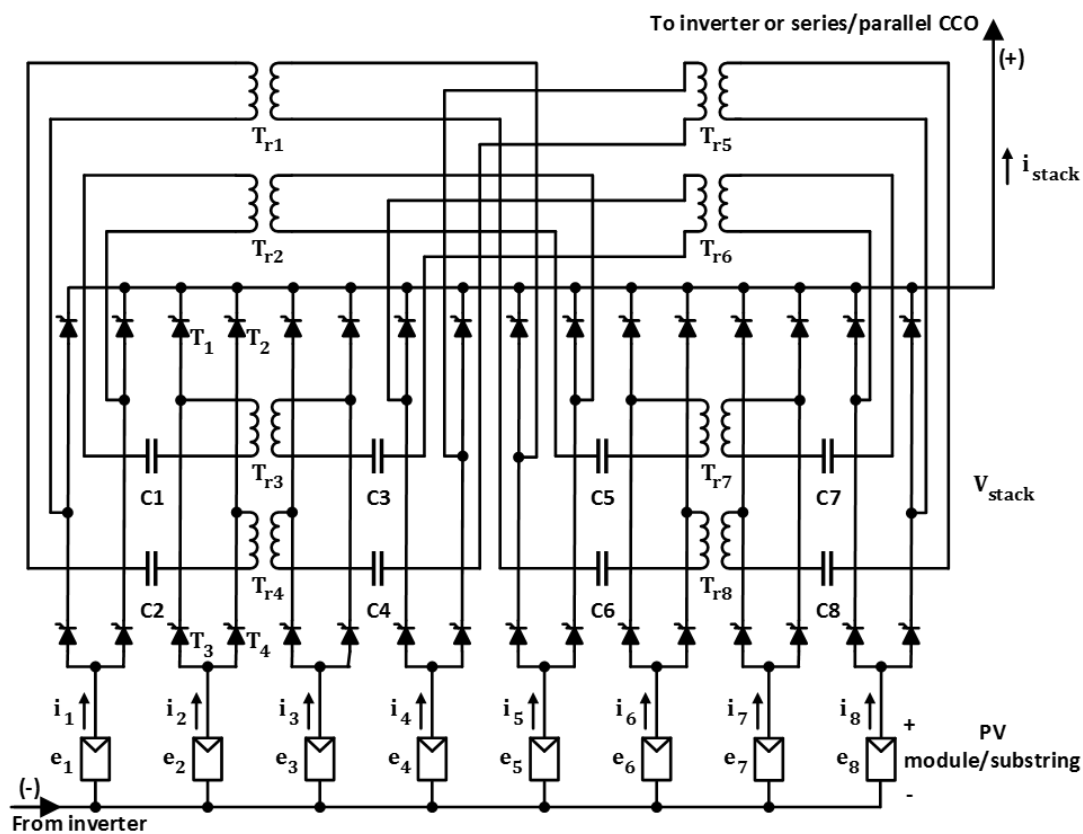


Рисунок 2 – Принципиальная электрическая схема ССО

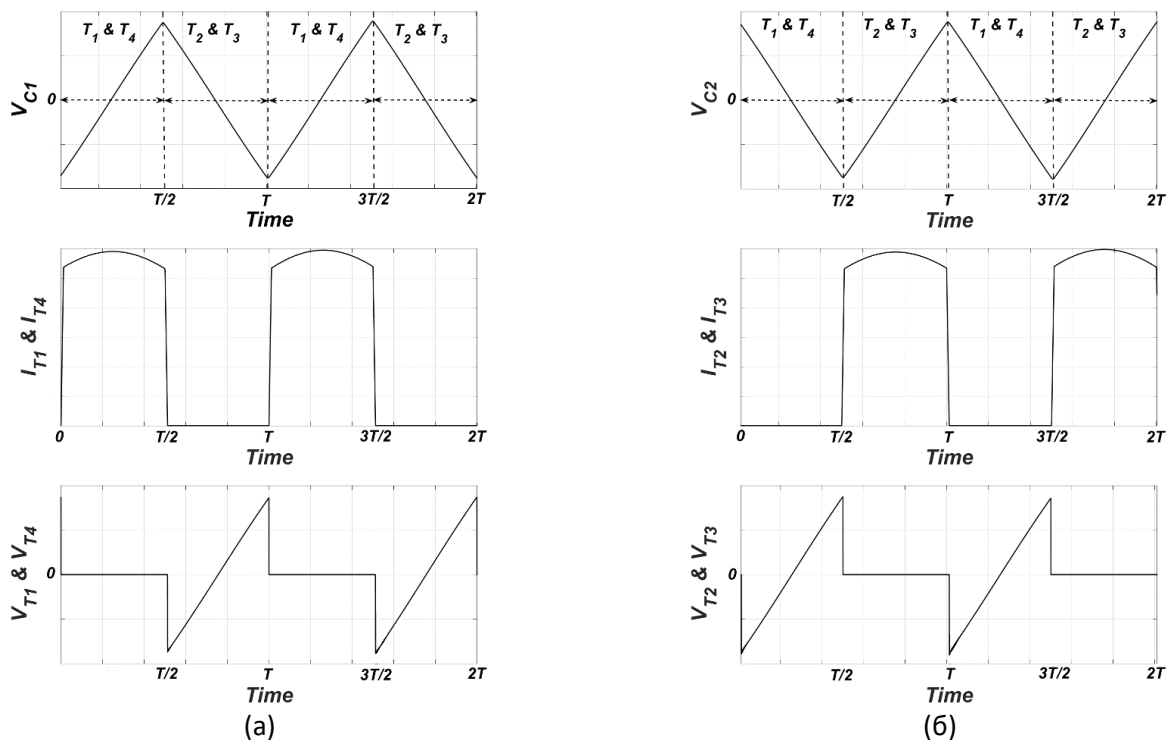


Рисунок 3 – Напряжение на конденсаторах связи и соответствующие формы тока и напряжения SCR: (а) верхний конденсатор и (б) нижний конденсатор

Трансформаторы симметрично связаны друг с другом относительно центра секции производства электроэнергии. Их функция заключается в компенсации разности напряжений между фотоэлектрическими модулями; при условии затенения до текущей точки консолидации v_{stack} .

Трансформаторы представлены индуктивностями и взаимной связью с приблизительно единичным коэффициентом связи (k_C), как указано ниже.

$$\begin{cases} R_m = k_C \sqrt{R_{s1} R_{s2}} \\ L_m = k_C \sqrt{L_{s1} L_{s2}} \text{ \& } 0 < k \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

Где $R_{s1}, R_{s2} \& L_{s1}, L_{s2}$ — это сопротивления и индуктивности обмоток трансформатора, R_m, L_m — это взаимное сопротивление и индуктивность трансформатора.

На первом полупериоде уравнения для напряжения двух соседних фотоэлектрических генераторов в одном блоке ССО задаются (2), а во втором полупериоде - (3).

$$\begin{cases} e_1 - 2R_s i_1 - 2L_s \frac{di_1}{dt} - R_m i_3 - L_m \frac{di_3}{dt} - R_m i_5 - L_m \frac{di_5}{dt} - v_{C1} - v_{stack} = 0 \\ e_2 - 2R_s i_2 - 2L_s \frac{di_2}{dt} - R_m i_4 - L_m \frac{di_4}{dt} - R_m i_6 - L_m \frac{di_6}{dt} - v_{C2} - v_{stack} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} e_1 - 2R_s i_1 - 2L_s \frac{di_1}{dt} - R_m i_3 - L_m \frac{di_3}{dt} - R_m i_5 - L_m \frac{di_5}{dt} - v_{C2} - v_{stack} = 0 \\ e_2 - 2R_s i_2 - 2L_s \frac{di_2}{dt} - R_m i_4 - L_m \frac{di_4}{dt} - R_m i_6 - L_m \frac{di_6}{dt} - v_{C1} - v_{stack} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

Где v_{stack} - это напряжение стека, i_j - токи, генерируемые фотоэлектрическими модулями, e_j - напряжения фотоэлектрических модулей, v_{Cj} - напряжение на конденсаторах связи.

Общая мощность одной батареи ССО в стационарных условиях может быть определена суммой тока всех фотоэлектрических генераторов и среднем напряжением фотоэлектрических модулей в данных атмосферных условиях.

$$\begin{cases} v_{stack} = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^8 e_j \\ i_{stack} = \sum_{j=1}^8 i_j \\ P_{stack} = v_{stack} \cdot i_{stack} \end{cases} \quad (4)$$

В четвертой части главы 3 проводится тематическое исследование для сравнения производительности ССО и массива SP в условиях частичного затенения. Две имитационные модели настроены для фермерских хозяйств мощностью 10 кВт из 40 модулей. Первая модель представляет собой традиционную ферму массива SP, построенную в виде 8 цепочек, каждая из которых состоит из 5 последовательных модулей с обходными диодами, а другая представляет собой 5 стеков ССО, соединенных последовательно, как показано на рисунке 1. Различные схемы затенения, как показано на рисунке 4 определены для прохождения облаков над фермой массива PV. Каждый шаблон состоит из двух разных уровней облучения; серый цвет обозначает затененный модуль, который получает солнечное излучение $0,6 \text{ кВт/м}^2$, а белый - полную освещенность, то есть 1 кВт/м^2 .

Для всех моделей температура считается неизменной - 25°C . Выходные характеристики массива фермы определяются путем поднятия напряжения на клеммах от нуля до напряжения холостого хода массива. На рисунке 5 показаны P-V характеристики моделей во время шаблона затенения (2), с указанием общего MPP в каждой модели.

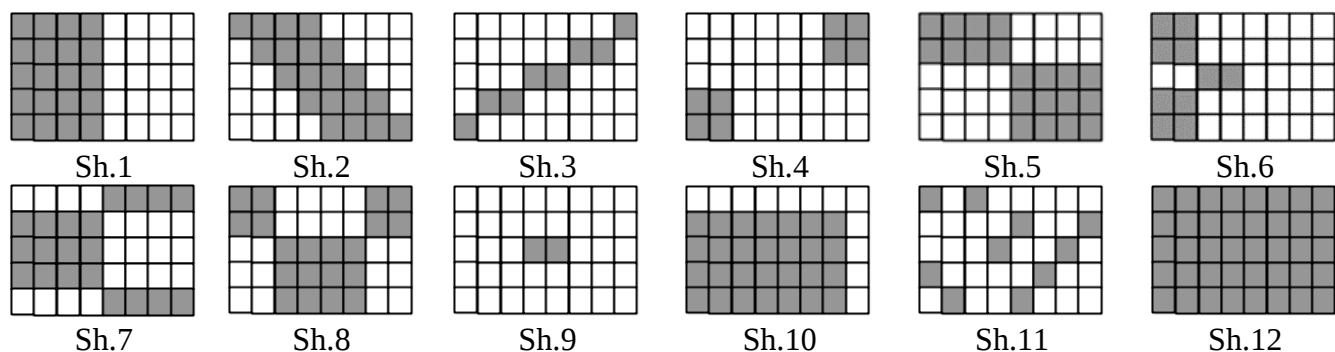


Рисунок 4 – Диаграмма различных условий затенения

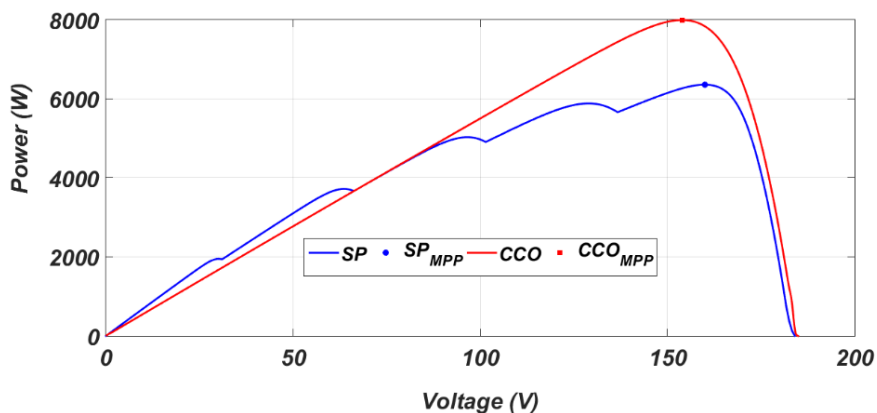


Рисунок 5 – P-V характеристики для модели затенения (2)

Из рисунка 5, в случае обычной SP топологии, P-V характеристики обладают несколькими MPP, включая глобальный и локальный MPP, что увеличивает вероятность ложного отслеживания MPP и требует усовершенствованного алгоритма MPPT для отслеживания глобальной MPP. С другой стороны, в случае топологии CCO характеристики P-V имеют уникальный MPP, за которым легко следовать простым алгоритмом MPPT. Графическая иллюстрация, которая сравнивает глобальную максимальную генерируемую мощность (GMPG) и потери мощности для обеих моделей во время всех моделей затенения, показана на рисунке 6.

Согласно результатам, GMPG, генерируемые с использованием топологии CCO, были значительно увеличены по сравнению с обычной топологией массива SP при различных шаблонах затенения. Потери мощности были существенно уменьшены, а также увеличилась эффективность использования энергии. Кроме того, локальные MPP, обнаруженные в случае подхода SP, были успешно устранены с использованием схемы CCO. Следовательно, топология CCO не страдала от потери мощности и требовала только простого алгоритма MPPT, чтобы следовать MPP в различных условиях окружающей среды. Причем разница напряжения между параллельными фотоэлектрическими генераторами; из-за частичного затенения с помощью CCO была компенсирована. Следовательно, циркулирующие токи между параллельными фотоэлектрическими генераторами были исключены.

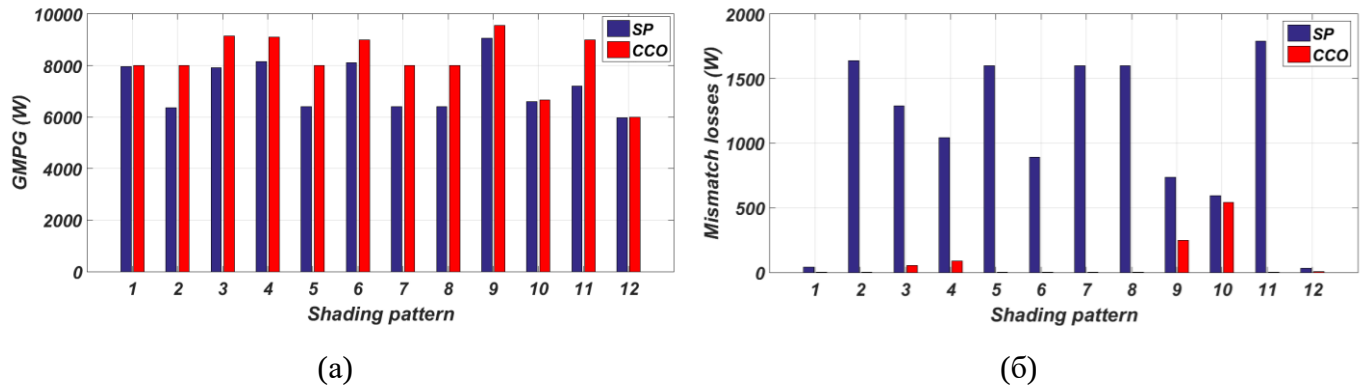


Рисунок 6 – Сравнительные гистограммы для двух топологий: (а) GMPG и (б) потери

Глава 4 Посвящена исследованиям вопросов использования сумматора тока для увеличения сбора энергии от неоднородных состаренных фотоэлектрических модулей. Из-за суровых внешних условий эксплуатации фотоэлектрической матрицы она подвергается неравномерному старению, которое приводит к существенной неодинаковости фотоэлектрических модулей. Это несоответствие искажает электрические характеристики фотоэлектрической матрицы, что, в свою очередь, снижает ее выходную мощность и эффективность. В этой главе предлагается топология ССО с подходами реконфигурации для фотоэлектрических модулей для решения проблемы неравномерного старения между последовательно соединенными фотоэлектрическими модулями без замены устаревших модулей новыми. Сравнительное исследование проводится с топологией массива SP, чтобы проиллюстрировать эффективность топологии ССО.

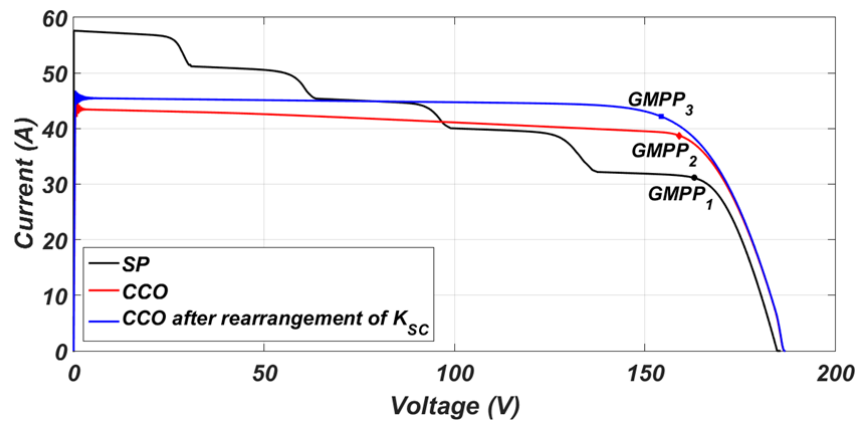
В первой части главы 4 представлена классификация потерь мощности при неравномерных условиях старения фотоэлектрической матрицы и обзор предыдущих работ, использованных для уменьшения этих потерь. Во второй и третьей частях главы 4 обсуждается производительность неоднородного частично устаревшего массива PV для топологии массива SP и топологии ССО. В этой главе шкалы старения (коэффициенты) используются в качестве переменного параметра, поскольку они прямо пропорциональны току короткого замыкания и напряжению холостого хода каждого отдельного фотоэлектрического модуля. Ток короткого замыкания и коэффициенты старения напряжения холостого хода исправного модуля устанавливаются равными 1 (р.у) при стандартных условиях тестирования (STC). Для всех симуляций вся фотоэлектрическая матрица работает на STC, чтобы устранить потери мощности из-за частичного затенения. Рассматриваются два сценария для оценки состояния старения PV-матрицы, состоящей из 40 неоднородно устаревших модулей.

В первом сценарии ток короткого замыкания используется для оценки состояния старения фотоэлектрического модуля, в то время как напряжение холостого хода поддерживается постоянным при различных условиях старения. Таким образом, коэффициент старения напряжения холостого хода (K_{OC}) для каждого модуля в первом сценарии устанавливается равным 1 п.н., в то время как коэффициенты старения тока короткого замыкания (K_{SC}) изменяются вследствие процесса старения. В таблице 1 показано распределение факторов старения тока короткого замыкания для первого сценария.

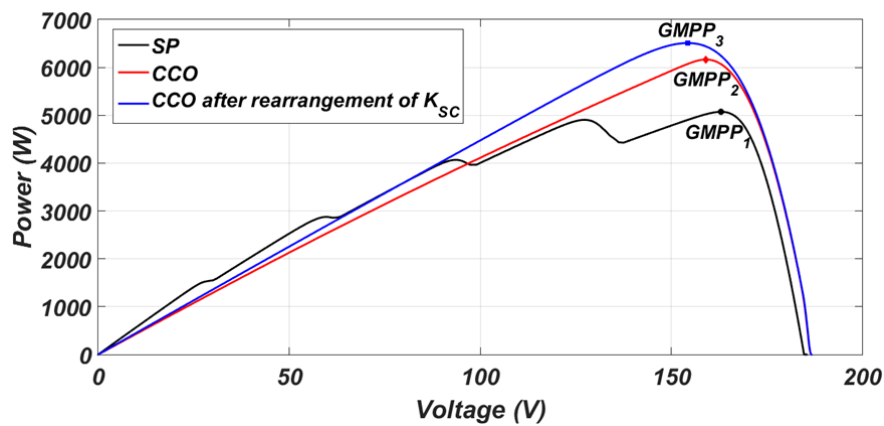
Таблица 1–Распределение факторов старения тока короткого замыкания по первому сценарию

Row (module)	Column (string)							
	0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.8
	0.8	0.8	0.6	0.5	0.7	0.7	0.4	0.6
	0.5	0.4	0.4	0.6	0.8	0.6	0.5	0.8
	0.7	0.6	0.7	0.7	0.9	0.9	0.8	0.7
	0.9	0.8	0.6	0.8	0.5	0.5	0.4	0.5

На рисунке 7 показаны кривые для массива PV для обеих топологий в первом сценарии, где GMPP1 и GMPP2 являются глобальными пиками для топологии массива SP и топологии CCO соответственно. Здесь рабочим параметром является коэффициент старения тока короткого замыкания (K_{SC}), который уже был выражен как единичное значение тока работоспособности каждого отдельного фотозлектрического модуля.



(a)



(б)

Рисунок 7 – Характеристики массива для обеих топологий по первому сценарию: (а) кривые I-V и (б) кривые P-V

Координаты напряжения и тока для GMPP1 равны (163,05 В, 31,11 А) с максимальной мощностью, равной 5072 Вт. Это означает, что дополнительные потери мощности в неоднородной устаревшей топологии массива SP равно 1428 Вт. Если MPP-трекеру не удастся отследить GMPP1,

потери мощности добавляется к вышеупомянутым дополнительным потерям. С другой стороны, топология GMPP2 для ССО расположена в координатах (159,13 В, 38,74 А) с максимальной мощностью, равной 6165Вт. Это означает, что максимальная мощность увеличивается на 1093 Вт по сравнению с топологией массива SP. Однако имеются потери мощности, равные 335 Вт, из-за несоответствия тока между последовательно соединенными цепями ССО.

Несоответствие тока между последовательно соединенными цепями ССО можно устранить путем физического переключения местоположения фотоэлектрических модулей из цепи ССО, которая имеет высокий K_{SC} , в цепь ССО, которая имеет низкий K_{SC} , так что все цепи ССО имеют одинаковую сумму коротких замыканий текущие старение факторы ($\sum K_{SC}$). Можно получить набор оптимальных решений, одно из которых показано в таблице 2. Как видно, $\sum K_{SC}$ одинакова для всех цепей ССО после перестановки фотоэлектрических панелей, таким образом, достигается оптимальная мощность, как показано на рисунке 7.

Таблица 2 – Иллюстрация процесса перестановки панелей для первого сценария

Before Rearrangement								$\sum K_{SC}$
0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.5	0.8	5.3 p.u
0.8	0.8	0.6	0.5	0.7	0.7	0.4	0.6	5.1 p.u
0.5	0.4	0.4	0.6	0.8	0.6	0.5	0.8	4.6 p.u
0.7	0.6	0.7	0.7	0.9	0.9	0.8	0.7	6.0 p.u
0.9	0.8	0.6	0.8	0.5	0.5	0.4	0.5	5.0 p.u
After Rearrangement								$\sum K_{SC}$
0.9	0.7	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.8	5.2 p.u
0.8	0.8	0.6	0.5	0.7	0.7	0.5	0.6	5.2 p.u
0.5	0.4	0.4	0.6	0.8	0.9	0.8	0.8	5.2 p.u
0.7	0.6	0.7	0.7	0.9	0.6	0.5	0.5	5.2 p.u
0.9	0.8	0.6	0.8	0.5	0.5	0.4	0.7	5.2 p.u

Новые координаты глобальной MPP (GMPP3) после перестановки устаревших модулей становятся (153,98 В, 42,17 А) с максимальной мощностью, равной 6493 Вт, что приблизительно соответствует ожидаемой максимальной мощности от фотоэлектрической матрицы. Анализ данных, представленных на рисунке 7, позволяет сделать вывод о повышении эффективности с помощью ССО и с использованием реконфигурации панелей. Процент максимальной выходной мощности к ожидаемой мощности, генерируемой до и после перестановки старых фотоэлектрических модулей, составляет 94,85% и 99,89% соответственно.

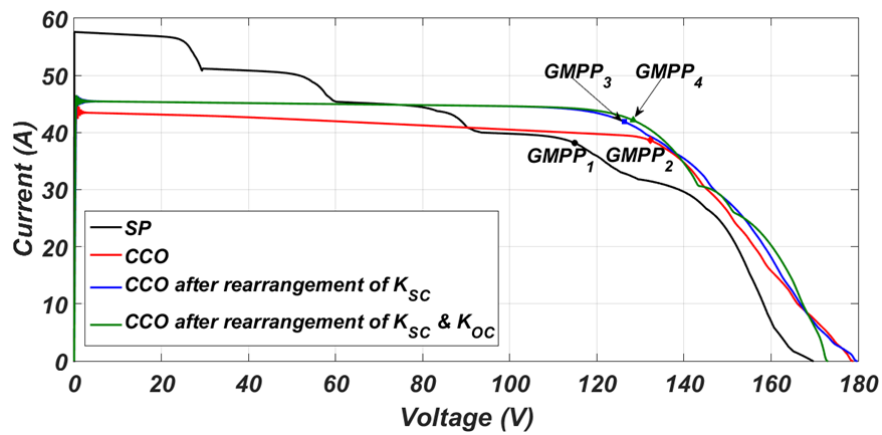
Во втором сценарии дополнительный коэффициент старения для каждого напряжения разомкнутой цепи включается в каждый модуль, как показано в таблице 3, чтобы подчеркнуть влияние скорости снижения напряжения разомкнутой цепи на выходную мощность фотоэлектрической матрицы.

Характеристики PV для обеих топологий по второму сценарию показаны на рисунке 8, где GMPP1 и GMPP2 — это MPP для топологии массива SP и топологии ССО перед любой перестройкой панелей PV. GMPP1 расположен в точке с координатами (114,93 В, 38,16 А) с максимальной мощностью, равной 4386 Вт. В этом случае рассогласование потерь мощности в неоднородной устаревшей топологии массива SP равно 1364 Вт. GMPP2 для топологии ССО расположен в координатах (132,27 В, 38,63 А) с максимальной мощностью 5110 Вт и потерями мощности равными 640 Вт. Это

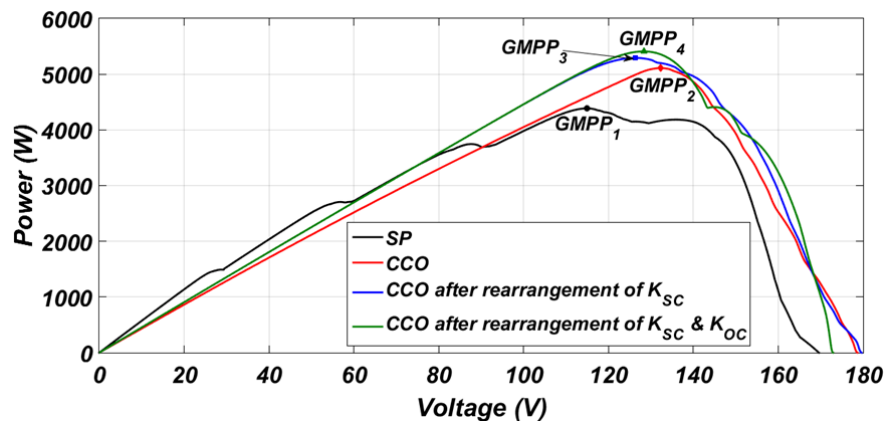
указывает на снижение потерь мощности для второго сценария на 53% по сравнению с топологией массива SP. Однако потери мощности все еще существует из-за несоответствия тока между последовательно соединенными ССО и несоответствия напряжения между параллельными фотоэлектрическими модулями в одном и том же ССО.

Таблица 3 – Распределение факторов старения по массиву для второго сценария

	Column (string)							
Row (module)	0.9 0.98	0.7 0.89	0.7 0.89	0.6 0.86	0.6 0.86	0.5 0.79	0.5 0.79	0.8 0.95
	0.8 0.95	0.8 0.95	0.6 0.86	0.5 0.79	0.7 0.89	0.7 0.89	0.4 0.70	0.6 0.86
	0.5 0.79	0.4 0.70	0.4 0.70	0.6 0.86	0.8 0.95	0.6 0.86	0.5 0.79	0.8 0.95
	0.7 0.89	0.6 0.86	0.7 0.89	0.7 0.89	0.9 0.98	0.9 0.98	0.8 0.95	0.7 0.89
	0.9 0.98	0.8 0.95	0.6 0.86	0.8 0.95	0.5 0.79	0.5 0.79	0.4 0.70	0.5 0.79



(a)



(б)

Рисунок 8 – Характеристики массива для обеих топологий по второму сценарию: (а) кривые I-V и (б) кривые P-V

Теперь рассмотрим ту же перестановку, что и для первого сценария, которая применяется ко второму сценарию, чтобы исключить потери мощности, вызванные неравенствами токов. Соответствующие кривые показаны на рисунке 8. Новые координаты GMPP3 становятся (126,31 В, 41,92 А) с максимальной мощностью, равной 5295 Вт. Это означает, что потери мощности из-за несоответствия напряжения между параллельными фотоэлектрическими панелями равно 455 Вт при этой конфигурации (т.е. приблизительно 7,9% ожидаемой мощности теряется). Фактически, напряжение MPP каждого модуля исчезает, и новый MPP для каждого ССО имеет небольшое отклонение напряжения, при котором каждый ССО выдает среднее значение напряжения MPP модулей в нем.

Если фотоэлектрические модули перемещены таким образом, чтобы все ССО имели одинаковое среднее значение суммы коэффициентов старения напряжения (т.е. $\frac{1}{8} \sum K_{OC}$), максимальная мощность снижается до 5257 Вт с потерей мощности 475 Вт (т.е. примерно 8,26% ожидаемой мощности теряется из-за большего различия напряжения MPP в каждом отдельном ССО), в то время как характеристические кривые становятся более плавными. К сожалению, среднее значение $\sum K_{OC}$, созданное всеми ССО, не удобно для отдельного напряжения MPP каждого модуля (характеристики этого случая не показаны на рисунке 8).

Эту проблему можно решить, уменьшив разнесение K_{OC} в каждом ССО и в то же время поддерживая условие одинаковой суммы K_{SC} для всех ССО. Таблица 4 иллюстрирует одно решение для перестановки фотоэлектрических панелей таким образом, и результирующие кривые массива фотоэлектрических элементов показаны на рисунке 8. Как видно, GMPP4 перемещается в координаты (128,29 В, 42,17 А) с максимальной мощностью, достигнутой для 5410 Вт, а потери мощности уменьшены до 340 Вт (т.е. примерно 5,9% от ожидаемой мощности).

Таблица 4 – Конфигурация массива PV после переустановки K_{SC} и K_{OC} для второго сценария

After Rearrangement								$\sum K_{SC}$	$\sum K_{OC}$
0.9	0.9	0.9	0.9	0.4	0.4	0.4	0.4	5.2 p.u	-----
0.98	0.98	0.98	0.98	0.70	0.70	0.70	0.70	-----	6.72 p.u
0.8	0.8	0.8	0.8	0.5	0.5	0.5	0.5	5.2 p.u	-----
0.95	0.95	0.95	0.95	0.79	0.79	0.79	0.79	-----	6.96 p.u
0.7	0.7	0.7	0.7	0.6	0.6	0.6	0.6	5.2 p.u	-----
0.89	0.89	0.89	0.89	0.86	0.86	0.86	0.86	-----	7.00 p.u
0.6	0.6	0.6	0.6	0.7	0.7	0.7	0.7	5.2 p.u	-----
0.86	0.86	0.86	0.86	0.89	0.89	0.89	0.89	-----	7.00 p.u
0.5	0.5	0.5	0.5	0.8	0.8	0.8	0.8	5.2 p.u	-----
0.79	0.79	0.79	0.79	0.95	0.95	0.95	0.95	-----	6.96 p.u

В пятой части главы 4 предлагается простой алгоритм реконфигурации для извлечения оптимальной мощности из неоднородно устаревших модулей для крупномасштабных приложений с топологией ССО. Эта стратегия реконфигурации требует, чтобы недорогие приборы периодически выполняли проверки тока короткого замыкания фотоэлектрических модулей во время технического обслуживания. Таким образом, предлагаемый алгоритм может существенно повысить эффективность использования энергии, а также прибыльность для любого масштаба системы PV.

В главе 5 предлагается методология управления трехфазным ССО, подключенным к сети для ввода электроэнергии в сеть в соответствии со стандартом IEEE 929. Принципиальная схема централизованного инвертора, подключенного к сети, на основе ССО изображена на рисунке 9. Как можно видеть, фотогальванические модули суммируются ССО, а затем подключаются к сети через

трехфазный двухуровневый инвертор источника напряжения (VSI). ССО используются для увеличения сбора энергии от фотоэлектрической матрицы вместо использования обходных и блокирующих диодов, которые искажают характеристики фотоэлектрической матрицы и уменьшают ее выходную мощность. Основными функциями VSI являются подача высококачественного переменного тока в сеть и совместное отслеживание точки максимальной мощности. Конденсатор используется перед VSI и действует как временное устройство накопления энергии для обеспечения постоянного потока энергии. Для того, чтобы отслеживать напряжение MPP из ССО, опорное напряжение звена постоянного тока (V_{dc}^*) регулируется. VSI используется для преобразования входной мощности постоянного тока от ССО в выходную мощность переменного тока с использованием стратегии управления с полностью отсоединенным током во вращающейся системе отсчета. Пассивный LC-фильтр используется после VSI, чтобы избавиться от нежелательных гармоник в подаваемом токе, за которым следует низкочастотный повышающий трансформатор. Приемная сеть моделируется эквивалентной схемой Тевенина.

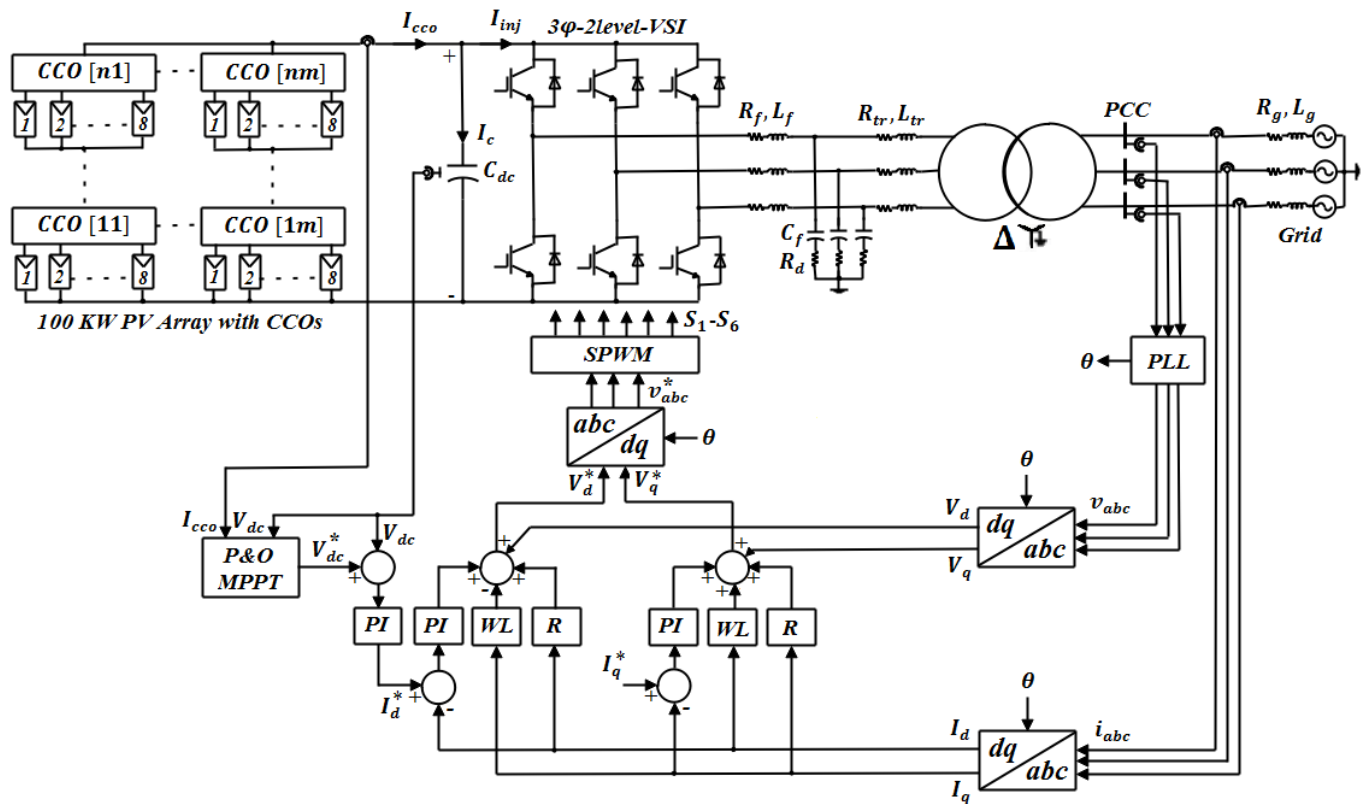


Рисунок 9 – Принципиальная схема подключенных к сети топологии ССО

Чтобы подтвердить осуществимость топологии ССО, выполнено моделирование на численной модели всей системы для ферм с 100-киловаттными солнечными батареями из 320 модулей. Прежде всего, чтобы продемонстрировать влияние частичного затенения на характеристики PV, рассмотрим следующие два сценария. Первый сценарий представляет собой обычную последовательную (SP) матрицу 10x32 с обходными диодами через каждые 5 последовательных модулей, во втором сценарии массив PV укладывается в последовательные параллельные ССО 2x4, что эквивалентно первому сценарию. Для обоих сценариев предположим, что 25% панелей освещены на 0,6 кВт/м², а остальные фотоэлектрические модули полностью освещены при постоянной температуре 25 °С. На рисунке 10 показаны соответствующие P-V-характеристики для двух сценариев при

стандартных условиях испытаний (STC) и условиях частичного затенения (PSC). Примечание: оба сценария имеют одинаковые характеристики в STC.

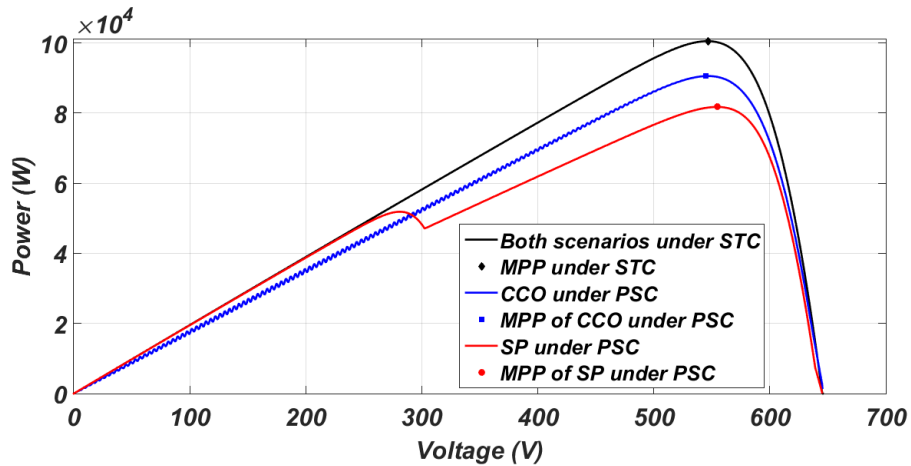


Рисунок 10 – P-V характеристики обоих сценариев при STC и PSC

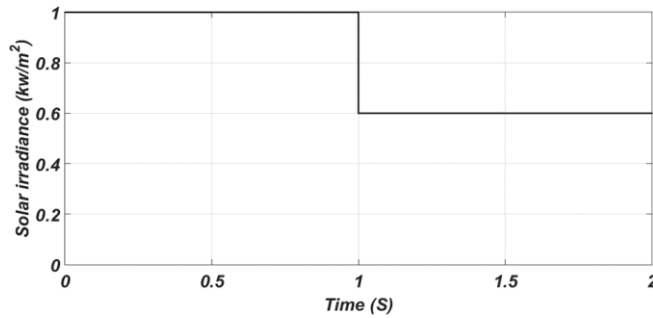
Как видно из рисунка 10, в случае топологии массива SP, характеристики PV показывают несколько MPP, которые увеличивают вероятность ложного отслеживания MPP. С другой стороны, в случае ССО характеристики P-V имеют единственную MPP, за которой легко следовать простым алгоритмом MPPT. Максимальные мощности, генерируемые в случае STC, затененного ССО и затененного массива SP, составляют 100 кВт, 90 кВт и 81,5 кВт при напряжениях MPP 547 В, 545 В и 554 В соответственно. Это означает, что в этой ситуации затенения 9,4% ожидаемой мощности теряется в обходных диодах топологии массива SP.

Чтобы исследовать эффективность контроллеров, выполняется динамическое моделирование с частичной тенью, обсуждавшейся ранее для 25% панелей, как показано на рисунке 11(а). На рисунке 11(б) и (в) показана выходная мощность заштрихованных и незаштрихованных панелей во время прогона моделирования. Как видно, уровень облучения упал за 1 секунду и оказывает непосредственное влияние на выходную мощность панелей. Величина напряжения на конденсаторах связи ССО снижается, чтобы компенсировать эту ситуацию частичного затенения и собирать общую мощность от затененных и не затененных подстрок при напряжении приблизительно MPP. Напряжение на верхних конденсаторах показано на рисунке 11(г), в то время как напряжение на нижних конденсаторах находится в противофазе с верхними конденсаторами. Общий выходной ток из всех стеков ССО (I_{CCO}) под PSC показан на рисунке 11(д). Общий ток, собираемый ССО, первоначально составляет 184,3 А, а затем падает до 165,5 А после частичного затенения.

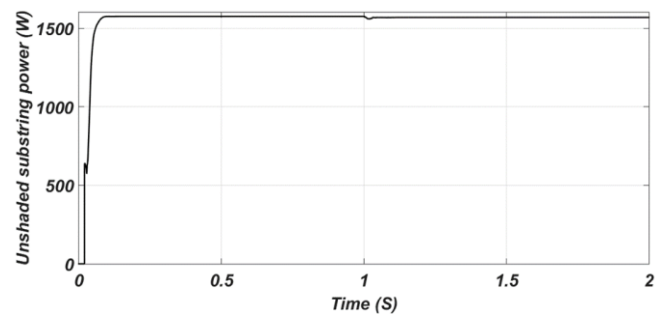
Напряжение звена постоянного тока контролируется, чтобы проверить работу контроллера напряжения звена постоянного тока и убедиться, что он отслеживает напряжение MPP в соответствии с PSC. Как показано на рисунке 11(е), напряжение в звене постоянного тока продолжало отслеживать MPP, обеспечиваемый алгоритмом P&O, и снижалось с 547 В до 545 В. Напряжение звена постоянного тока контролируется для проверки работы контроллера. Компоненты постоянного тока подаваемого тока показаны на рисунке 11(ё). D-компонент управляется в соответствии с новым эталонным значением, определяемым контроллером звена постоянного тока при 0,9 п.н., которое снижается с 1 п.н. при ясном небе. Однако эталон для q-компонента оставался нулевым, чтобы поддерживать единичную работу коэффициента мощности.

Динамические характеристики напряжения трехфазной сети и тока сетки в точке общей связи (PCC) под PSC показаны на рисунке 11(ж) и рисунке 11(з) соответственно. Как и ожидалось, форма напряжения сети не изменяется во время переходного процесса, поскольку она задается сетью переменного тока, тогда как амплитуда тока сети уменьшается в ответ на частичное затемнение. Как видно на рисунке 11(з), регулятор тока предлагает быстрый динамический отклик. Для получения установившегося тока потребовалось около 0,02 секунды или один период после частичного затемнения. На рисунке 11(и) показано смещение фазы (угол) между фазным током и фазным напряжением на PCC при PSC (то же самое для других фаз), где ток сети находится в фазе с напряжением сети (то есть сеть работает с единичным коэффициентом мощности).

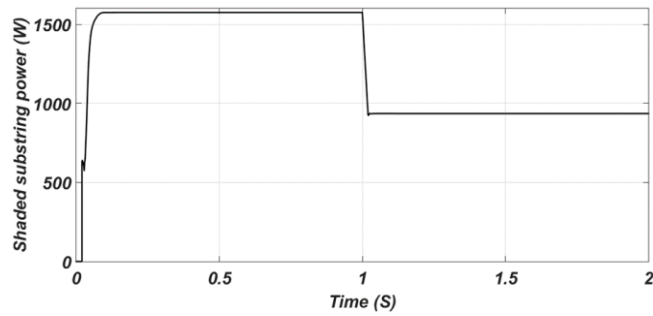
Активная и реактивная мощность, передаваемая в сеть в PCC, показана на рисунке 11(й). Активная мощность первоначально составляет 100 кВт, а затем снижается до 90 кВт после того, как происходит частичное затемнение, в то время как реактивная мощность, подаваемая в сеть, поддерживается на нулевом значении кВАр. Общее гармоническое искажение тока (THDC) на PCC во временной области показано на рисунке 11(к). Как можно видеть, предел THDC менее 5% установлен стандартом IEEE 929. Это означает, что пассивный фильтр имеет очень хорошие характеристики при PSC.



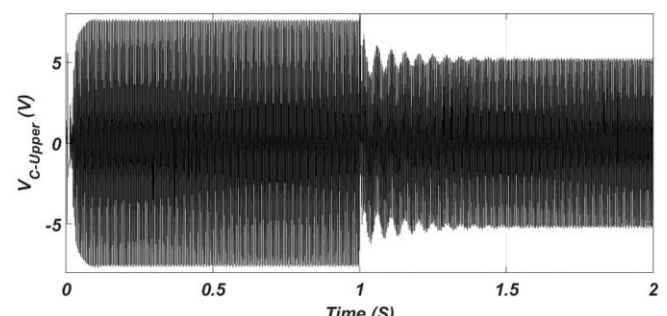
(a)



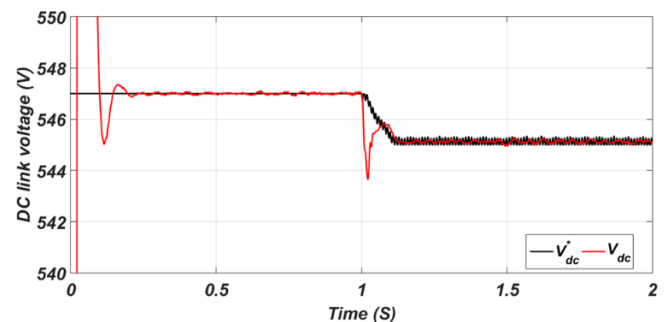
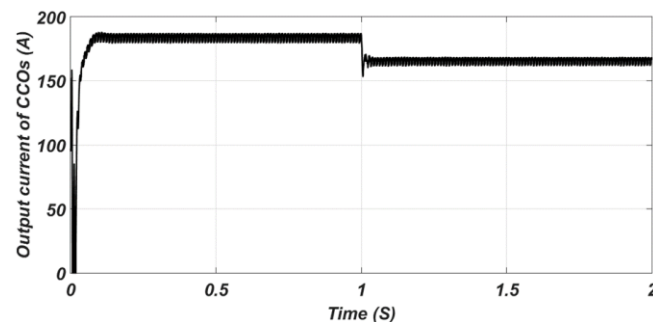
(б)



(B)



(Г)



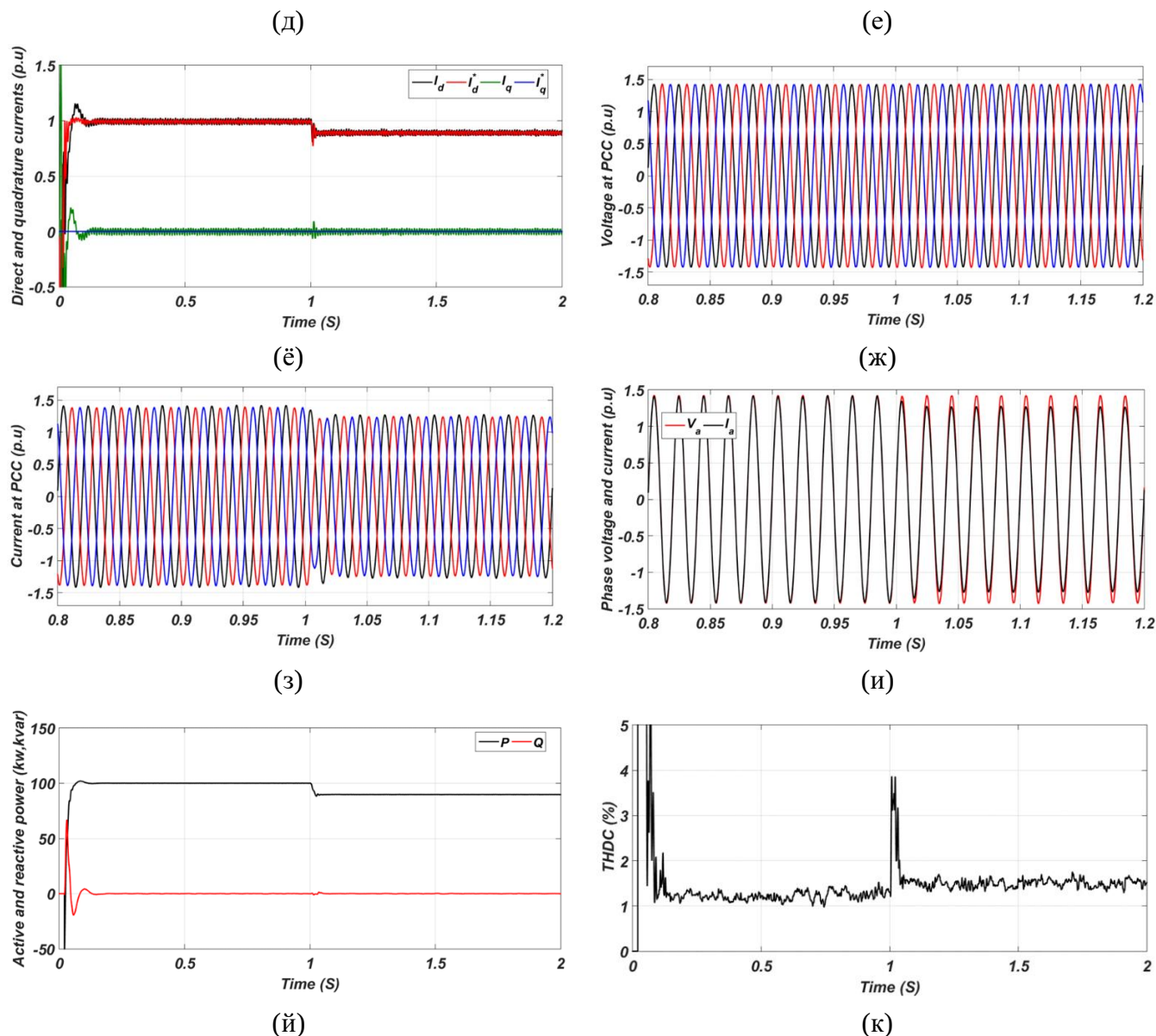


Рисунок 11 — Результаты моделирования под PSC

Согласно результатам моделирования, предложенная стратегия управления для трехфазной топологии ССО, подключенной к сети, предлагает превосходный устойчивый отклик, быстрый динамический отклик, низкое общее гармоническое искажение тока, идеальное и надежное отслеживание MPP во время STC и PSC. Кроме того, ток, подаваемый в сеть, находится в фазе с напряжением в сети (работа с единичным коэффициентом мощности). Следовательно, производительность системы соответствует стандарту IEEE 929. Кроме того, максимальная мощность, генерируемая с использованием топологии ССО, значительно увеличивается по сравнению с обычной топологией массива SP при условии частичного затенения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель работы состояла в том, чтобы разработать методы использования централизованного инвертора для снижения потерь мощности на фотоэлектрических электростанциях в условиях

частичного затенения, максимизации мощности, генерируемой неоднородными устаревшими фотоэлектрическими матрицами, и подачи высококачественной энергии в сеть для реализации стандарта IEEE 929. Основные результаты исследования можно резюмировать следующим образом:

1. Используя ССО, электрические характеристики фотоэлектрической матрицы были улучшены, и показана плавность изменения P-V характеристик панелей, а также единственной точки MPP даже в условиях частичного затенения или неравномерного старения панелей.
2. Локальные MPP, которые были обнаружены в случае традиционного подключения массива SP, были успешно устранены путем использования ССО.
3. Были ликвидированы потери мощности, которые могут возникнуть при неверном определении точки MPP, для частично затененных или неравномерно состарившихся PV матриц.
4. Показано, что использование ССО позволяет нам применять простой алгоритм MPPT для отслеживания MPP.
5. Полностью компенсированы разности напряжений между параллельными фотоэлектрическими генераторами, возникающие из-за частичного затенения или различия в характеристиках PV матриц, соответственно, циркуляционные токи между параллельными фотоэлектрическими генераторами исключены.
6. Показано, что за счет использования ССО в условиях частичного затенения потери мощности существенно снижаются, а также повышается энергоэффективность всей солнечной станции.
7. Решена проблема неравномерного старения среди последовательно соединенных фотоэлектрических модулей без замены устаревших модулей новыми. ССО используется для увеличения отбора энергии от неоднородных фотоэлектрических модулей старения. Оптимальная мощность достигается, если ток короткого замыкания используется для оценки процесса старения, близкая к оптимальной мощность достигается, когда ток короткого замыкания и напряжение холостого хода используются для оценки процесса старения.
8. Результаты моделирования ССО, связанного с сетью, показывают, что предложенная методология управления предлагает превосходный устойчивый отклик, быстрый динамический отклик, низкое значение THD тока, при единичном коэффициенте мощности, идеальное и надежное отслеживание MPP. В целом предложенная система полностью соответствует стандарту IEEE 929.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в научных журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий ВАК:

1. Рефаат А., Элгамал М., Коровкин Н.В. Новая централизованная топология фотоэлектрических преобразователей, работающих с сетью, оптимизированная для условий частичного затенения //Электричество, №10, С. 54-60, 2019.
2. Рефаат А., Осман М.Н., Коровкин Н.В. Оптимальное извлечение энергии из неоднородно стареющего фотоэлектрического массива с использованием сумматора тока //Электричество, №7, С. 59-68, 2019.

Публикации на английском языке, индексируемые в международных цитатно-аналитических базах данных (Scopus, Web of Science):

3. Refaat A., Korovkin N. A new photovoltaic current collector optimizer to enhance the performance of centralized inverter topologies // B. Int. Sci. Conf. Energy Manag. Munic. Facil. Sustain. Energy Technol. EMMFT 2018, Adv. Intell. Syst. Comput. 982 (1) Publisher Springer Int. Publ. 2019. Vol. 982. P. 216–224.
4. Refaat A., Elgamal M., Korovkin N.V. A novel photovoltaic current collector optimizer to extract maximum power during partial shading or mismatch conditions // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). Russia: IEEE, 2019. P. 403–408.
5. Refaat A., Osman M.H. Current collector optimizer topology to improve maximum power from PV array under partial shading conditions // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. Vol. 643, № 1. P. 012094.
6. Refaat A., Osman M.H., Korovkin N. V. Current collector optimizer topology to extract maximum power from non-uniform aged PV array // Energy. 2020. Vol. 195. P. 116995.
7. Osman M.H., Refaat A. Adaptive multi-variable step size P&O MPPT for high tracking-speed and accuracy // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 2019. Vol. 643, № 1. P. 012050.
8. Refaat A., Shehata A.A., Elgamal M., Korovkin N.V. Current collector optimizer topology with reconfiguration algorithm to harvest optimal power from nonuniform aged PV arrays // 2020 International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon) 2020. P. 1–7.
9. Elgamal M., Korovkin N.V., Refaat A., Elmitwally A. An Optimal day-ahead operation strategy for hybrid energy microgrid // 2019 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus). 2019. P. 485–490.
10. Elgamal M., Korovkin N.V., Refaat A., Elmitwally A. Optimal operation of a hybrid-energy microgrid with energy storage system // E3S Web of Conferences / ed. Mottaeva A. 2019. Vol. 138. P. 01003.
11. Shehata A.A., Refaat A., Ahmed M.K., Korovkin N.V. Optimal placement and sizing of FACTS devices based on autonomous groups partial swarm optimization technique // Archives of Electrical Engineering, (Впечаті).
12. Shehata A.A., Refaat A., Korovkin N.V. Optimal allocation of FACTS based on multi-objective multi-verse optimizer algorithm for multi-objective power system optimization problems // 2020 International multi-conference on industrial engineering and modern technology (FarEastCon) 2020. P. 1–7.