Санкт-Петербургский политехнический университет
Петра Великого

Махмуд Ахмед Рефаат Абуэльфадл

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ СИСТЕМ СУММИРОВАНИЯ ТОКА ПАНЕЛЕЙ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

Направление подготовки: 13.06.01«Электро- и теплотехника»

Код и наименование

Направленность: 13.06.01_4 «Теоретическая электротехника»

Код и наименование

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД

об основных результатах научно-квалификационной работы (диссертации)

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

Официальные оппоненты:

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»

Общая характеристика работы

<u>Актуальность темы исследования и степень проработанности.</u> В последние десятилетия проблемы нехватки энергии и загрязнения окружающей среды стали важнейшими темами исследований во всем мире. Таким образом, тенденции использования систем возобновляемой энергии привлекают все больше внимания к снижению энергетического кризиса и выбросов углерода. Среди всех различных технологий использования возобновляемых источников энергии солнечные фотоэлектрические (PV) системы быстро растут на рынках электроэнергии и, как ожидается, сохранят эту тенденцию в ближайшем будущем, будучи более чистыми и более экологически чистыми энергетическими ресурсами, чем традиционные, такие как ископаемое топливо, уголь 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 их производства энергии.

Централизованная архитектура инвертора является наиболее часто используемой технологией для крупных фотоэлектрических установок, подключенных к сети, благодаря высокой эффективности преобразования и низкому соотношению цены к мощности. Однако мощность, генерируемая обычным центральным инвертором с топологией последовательно-параллельных (SP) массивов, значительно снижается в условиях частичного затенения. Одной из технических проблем для технологии центрального инвертора является отсутствие операции максимальной точки мощности (MPP) для каждого модуля из-за условий частичного затенения. Обходные диоды, которые используются для предотвращения эффекта горячих точек модулей, деформируют характеристики массива PV и демонстрируют множество пиков, включая глобальный MPP и локальные MPP, что затрудняет отслеживание глобального MPP с использованием простого алгоритма отслеживания MPP (MPPT). Кроме того, во время частичного затенения трекер MPP может следовать за локальным пиком вместо глобального пика, что приводит к вводящим в заблуждение потерям мощности.

Еще одна техническая проблема для технологии центрального инвертора с SP-массивом заключается в том, что выходная мощность существенно снижается в условиях неравномерного старения. Неравномерное старение фотоэлектрических панелей является распространенной проблемой на заводах по производству фотоэлектрических панелей, поскольку они часто работают в суровых условиях окружающей среды в течение длительного периода эксплуатации. Из-за высокой цены на замену старых фотоэлектрических 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.

В дополнение к эффективности системы, высококачественная вводимая мощность 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 этом тезисе стандарт IEEE 929 будет использоваться для достижения этой цели.

Цель работы: Целью работы является разработка технологии 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 задачи:

1. Изучить влияние частичного затенения на эффективность централизованной инверторной технологии с топологией последовательно-параллельных (SP) массивов и обзор литературы предыдущих исследований, использованных для минимизации частичных потерь затенения.
2. Классифицировать потери мощности в условиях неравномерного старения фотоэлектрической матрицы и обзор предыдущих работ, использованных для уменьшения этих потерь.
3. Изучите стандарты и требования, касающиеся подключения фотоэлектрических систем к электросети.
4. Предложить новую топологию для централизованной инверторной технологии.
5. Настройка математических уравнений предлагаемой системы топологии.
6. Моделирование и симуляция предложенной топологии системы.
7. Анализ и обсуждение полученных результатов в условиях частичного затенения. Необходимо провести сравнительное исследование с традиционной топологией массива SP, чтобы показать эффективность предложенной топологии.
8. Анализ и обсуждение полученных результатов в условиях неравномерного старения фотоэлектрических модулей.
9. Предложите методологию управления для новой топологии и ее схемы управления для трехфазных сетевых приложений.
10. Исследование эффективности методологии контроля для приложений, связанных с сетью.
11. Выводы и рекомендации для будущей работы.

Научная новизна работы соискателя заключается в том, что:

1. Создайте новую топологию централизованного инвертора, подключенного к сети, на основе нового фотоэлектрического оптимизатора токосъемника (CCO), чтобы повысить выходную мощность от фотоэлектрической матрицы в условиях частичного затенения.
2. Предложите подходы реконфигурации для устаревших фотоэлектрических модулей топологии CCO 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 вместе.
3. Создайте методологию управления для топологии CCO, подключенной к сети, чтобы проверить стандарт IEEE 929.

Теоретическая значимость Разработана и смоделирована на MATLAB/SIMULINK новая топология инвертора, основанная на сумматоре тока, повышающая эффективность солнечной электростанции в условиях частичного затенения. Топология сумматора тока протестирована совместно с подходами реконфигурации, чтобы максимизировать мощность, извлекаемую из неоднородных устаревших фотоэлектрических модулей, а также созданы программы модельрования 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: Математическая и компьютерное моделирование, сравнительный анализ, алгоритмы, и 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 M-кода.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Показано, что мощность, вырабатываемая с помощью традиционной технологии централизованного инвертора с топологией массива SP, резко снижается в неидеальных условиях из-за несоответствия между фотоэлектрическими панелями. Основными причинами этого несоответствия являются частичное затенение и неоднородные условия старения между фотоэлектрическими модулями. При обоих условиях характеристики всего массива фотоэлектрических элементов деформируются и демонстрируют множество пиков, включая глобальные 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 вводящим в заблуждение потерям мощности.

2. Предлагается новая топология на основе схем, известная как топология оптимизатора токосъемника (CCO), для увеличения мощности, извлекаемой из фотоэлектрической матрицы в условиях частичного затенения и неравномерного старения.
3. Используя топологию CCO, электрические характеристики массива PV улучшаются с помощью плавных кривых и уникального MPP, за которым может легко следовать простой алгоритм MPPT. Локальные MPP, найденные в случае топологии массива SP, успешно устраняются путем использования цепей CCO. Впоследствии топология CCO не страдает от вводящих в заблуждение потерь мощности. Кроме того, различия в напряжении между параллельными генераторами PV; из-за частичного затенения или неравномерного старения условия компенсируются путем оптимизации до текущей точки консолидации. Следовательно, циркуляционные токи между параллельными фотоэлектрическими генераторами исключаются.
4. В условиях частичного затенения потеря несоответствия мощности существенно снижается, а также повышается энергоэффективность за счет использования топологии CCO.
5. Проблема неравномерного старения среди последовательно соединенных фотоэлектрических модулей решается без замены устаревших модулей новыми. Топология CCO используется для увеличения сбора энергии от неоднородных фотоэлектрических модулей старения. Оптимальная мощность достигается, если ток короткого замыкания используется для оценки процесса старения, тогда как близкая к оптимальной мощность достигается, когда ток короткого замыкания и напряжение холостого хода используются для оценки процесса старения.
6. Предлагается методология управления трехфазной топологией CCO, подключенной к сети, и ее схемы управления, чтобы вводить в сеть высококачественную 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 мультидисциплинарная конференция по промышленному инжинирингу и современным технологиям «2020 International multi-conference on industrial engineering and modern technologies (FarEastCon)». (Владивосток, осторов Русский, 6 – 9 октября 2020).

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

Структура и объем работы. Диссертация изложена на 144 страницах, имеет 10 таблиц, 77 рисунок, включает 2 титульные лист, аннотация, оглавления, список рисунков, списка таблиц, список символов, список сокращений, 6 глав, список литературы из 120 намиенований и приложение на 5 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **аннотации** дается краткое изложение актуальности работы, проблем, связанных с исследованиями, и предлагаемых методов решения этих проблем.

Глава 1 обсуждает актуальность работы, исследовательские мотивы работы и цели, которые должны быть достигнуты из нее. Схема представлена, чтобы дать резюме тем, затронутых в каждой главе. В конце концов, список публикаций приводится в конце главы.

В **главе 2** представлен общий обзор фотоэлектрических энергосистем, включая математическое моделирование фотоэлектрических генераторов, классификацию фотоэлектрических систем, топологию блоков питания (PCU), извлечение максимальной мощности из фотоэлектрических генераторов, инвертор источника напряжения (VSI), синусоидальную широтно-импульсную модуляцию (SPWM) техника, требования и стандарты для фотоэлектрических систем, подключенных к сети.

Глава 3 «Текущая топология Оптимизатора коллектора для смягчения эффекта частичного затенения»

В **первой части главы 3** обсуждается влияние частичного затенения на эффективность технологии централизованного инвертора с топологией последовательно-параллельных (SP) массивов. **Вторая часть главы 3** содержит обзор предыдущих работ, использованных для минимизации частичных потерь затенения.

В третьей части главы 3 предложена топология на основе схем, известная как топология сборщика тока (ССО), для повышения мощности, извлекаемой из фотоэлектрической матрицы в условиях частичного затенения. Схема предлагаемой топологии ССО 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 в сетке через инвертор. Цепи ССО используются для улучшения сбора энергии от фотоэлектрической матрицы вместо использования обходных и блокирующих диодов, которые искажают характеристики фотоэлектрической матрицы и уменьшают ее выходную мощность. Основными функциями цепей ССО являются сбор тока от фотоэлектрических модулей при напряжениях, близких к максимальным точкам питания (MPP), и обеспечение плавных выходных характеристик с одним MPP для инвертора. В то время как функции инвертора состоят в том, чтобы преобразовать мощность постоянного тока в мощность переменного тока и выполнить отслеживание точки максимальной мощности (MPPT) вместе.

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

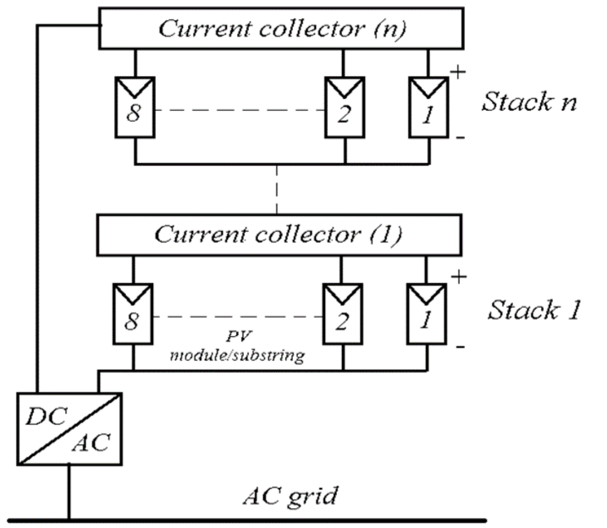


Рис. 1 Принципиальная схема топологии ССО.

Н-мосты соединены друг с другом через восемь конденсаторов ($C_1 - C_8$) и трансформаторов ($T_{r1} - T_{r8}$), которые действуют как цепь самокоммутации и компенсируют разницу напряжения между параллельными генераторами PV. 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 тиристоров осуществляется при разряде конденсаторов связи. На рис. 3 показаны формы сигналов напряжения на верхнем и нижнем конденсаторах и соответствующие формы сигналов тока и напряжения SCR во время установившейся работы ССО. Как можно видеть, указанные SCR в формах напряжения напряжения конденсаторов связи являются включенными, где T - длительность полного цикла.

Трансформаторы связи 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}.

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

$$\begin{cases} R_m = k_C . \sqrt{R_{s1} . R_{s2}} \\ L_m = k_C . \sqrt{L_{s1} . L_{s2}} \quad \& \; 0 < k \leq 1 \end{cases} \tag{1}$$

Где R_{s1}, R_{s2} & L_{s1} , L_{s2}- это самосопротивление и индуктивность обмоток трансформатора, R_m , L_m- это взаимное сопротивление и индуктивность трансформатора.

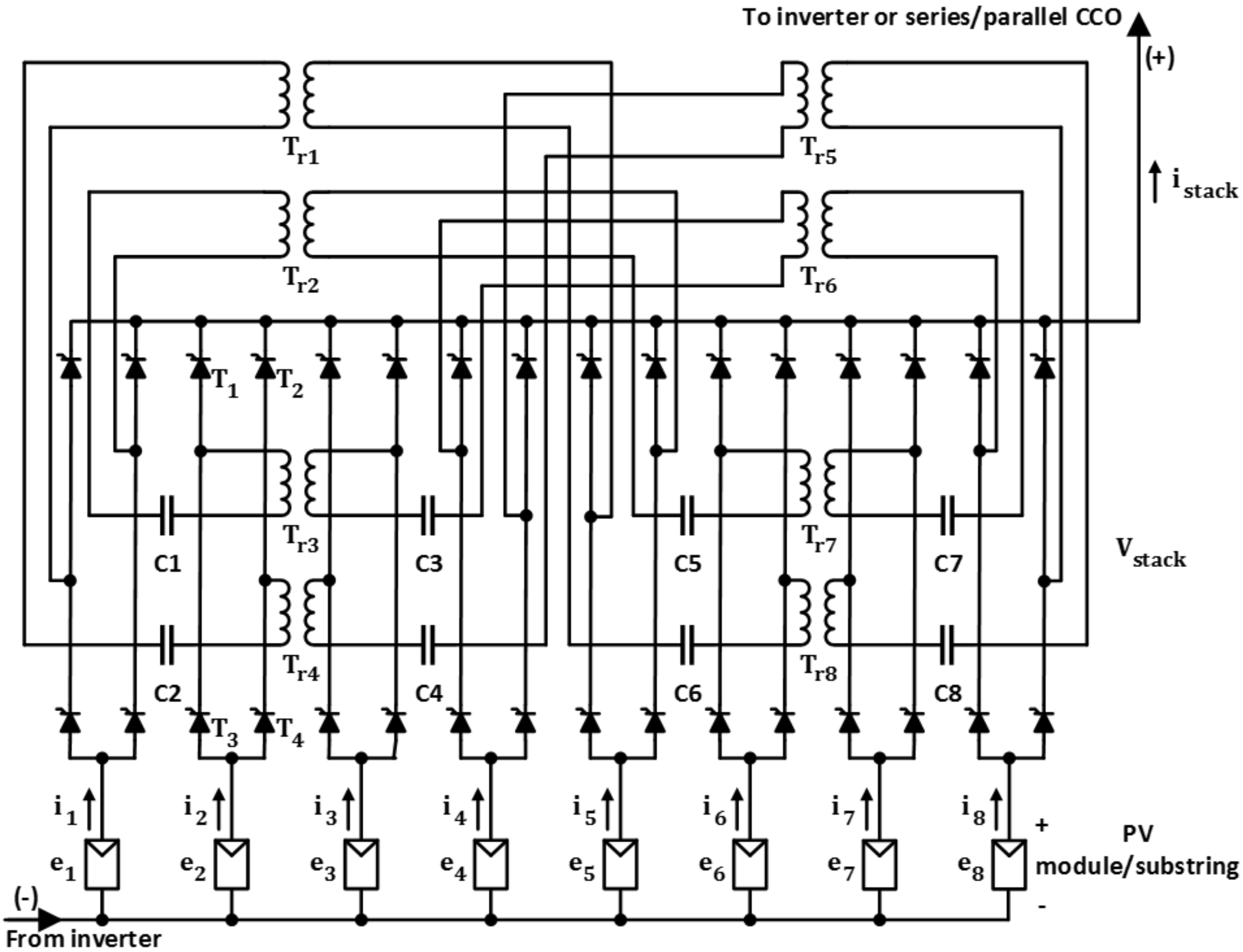


Рис. 2 Принципиальная электрическая схема ССО.

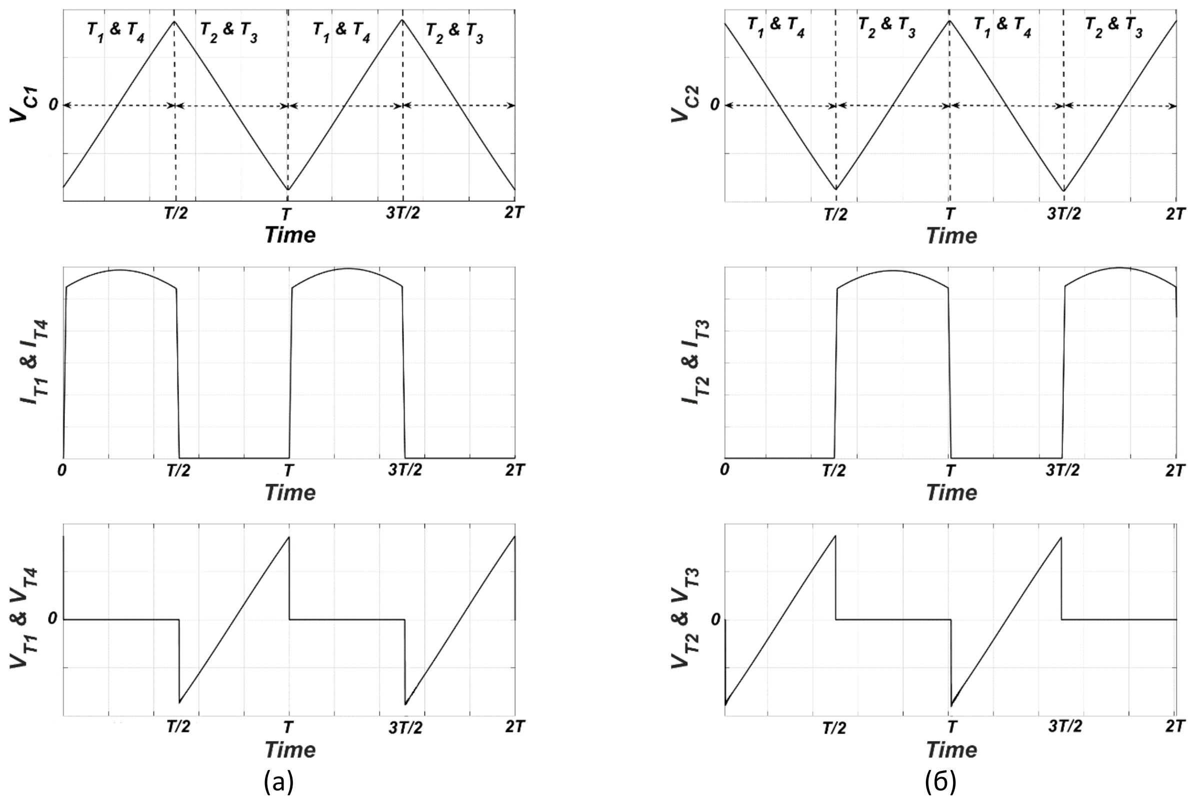


Рис. 3 Напряжение на конденсаторах связи и соответствующие формы тока и напряжения SCR: (a) верхний конденсатор и (б) нижний конденсатор.

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

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

(2)

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

(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 среднего напряжения фотоэлектрических модулей в данных атмосферных условиях.

$$\begin{cases} v_{stack} = \frac{1}{8}\sum_{j=1}^{8} e_j \\ i_{stack} = \sum_{j=1}^{8} i_j \\ P_{stack} = v_{stack}.i_{stack} \end{cases} \tag{4}$$

В **четвертой части главы 3** проводится тематическое исследование для сравнения производительности топологии CCO и топологии 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 CCO, соединенных последовательно, как показано на рисунке 1. Различные схемы затенения, как показано на рис. 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 кВт/м^2, а белый - полную освещенность модуля, то есть 1 кВт/м^2.

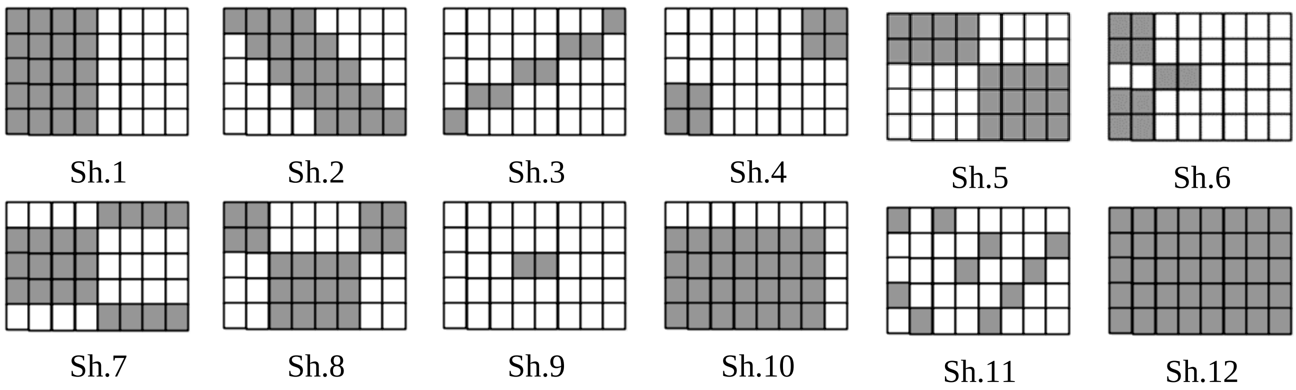


Рис. 4 Диаграмма различных условий затенения.

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

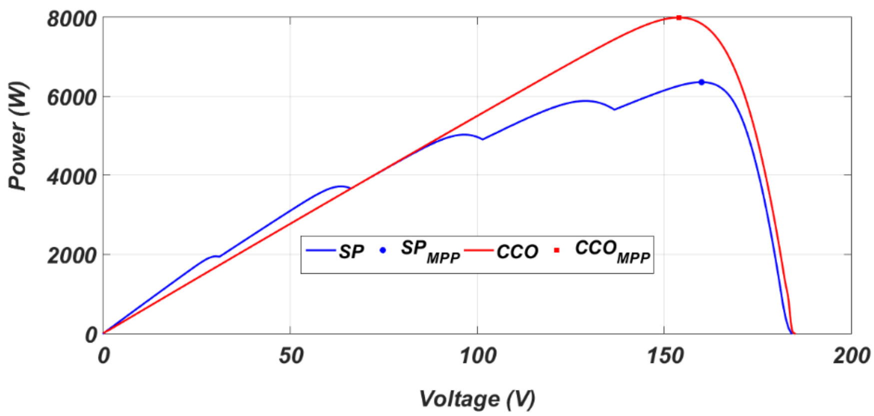
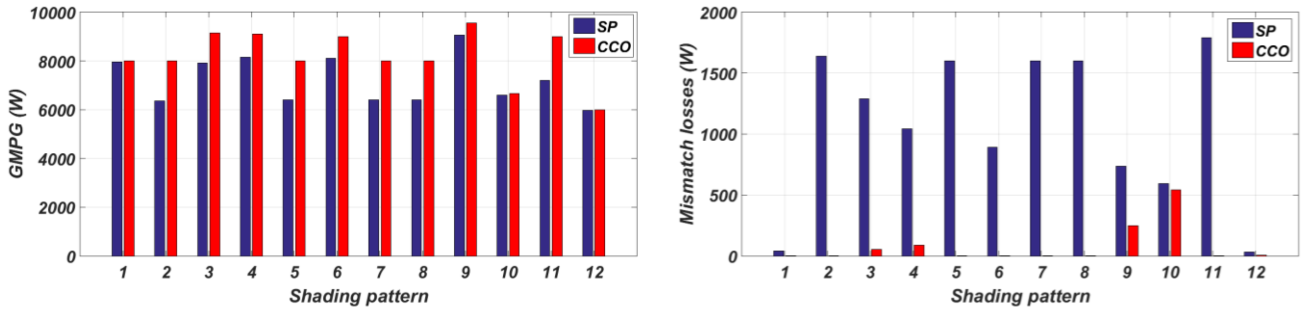


Рис. 5 P-V характеристики для моделей затенения (2).

Из рис. 5, в случае обычной SP топологии, P-V характеристики обладают несколько 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 в соответствии с Мишем для обеих моделей во время всех моделей затенения, показана на рисунке 6.

Согласно результатам, глобальные максимальные мощности, генерируемые с использованием топологии CCO, были значительно увеличены по сравнению с обычной топологией массива SP при различных шаблонах затенения. Впоследствии потеря несоответствия мощности была существенно уменьшена, 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 вводящей в заблуждение 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 через оптимизатор была компенсирована текущая точка консолидации. Следовательно, циркулирующие токи между параллельными фотоэлектрическими генераторами были исключены.



(a) (б)

Рис. 6. Сравнительные гистограммы для двух топологий: (a) GMPG и (б) несоответствие потерь.

Глава 4 «Топология Оптимизатора коллектора тока для увеличения сбора энергии от неоднородных состаренных фотоэлектрических модулей»

Из-за суровых внешних условий эксплуатации фотоэлектрической матрицы она подвергается явлению неравномерного старения, которое приводит к несоответствию между фотоэлектрическими модулями. Это несоответствие искажает электрические характеристики фотоэлектрической матрицы, что, в свою очередь, снижает ее выходную мощность и эффективность. В этой главе предлагается топология CCO 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 CCO.

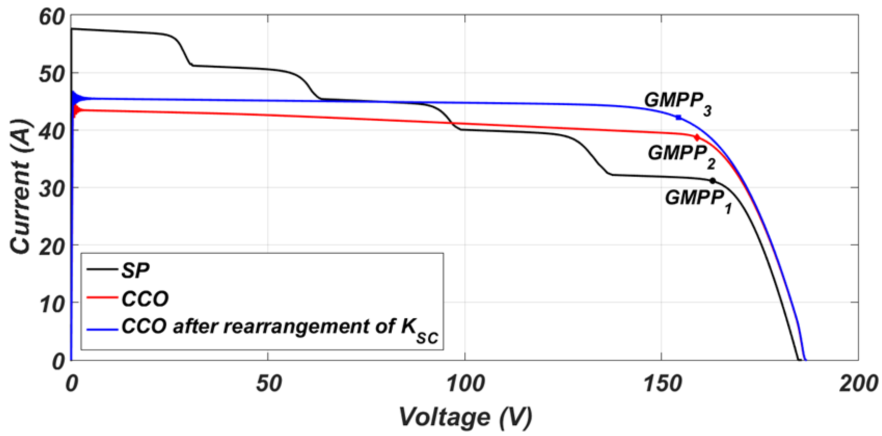
В **первой части главы 4** представлена классификация несоответствующих потерь мощности при неравномерных условиях старения фотоэлектрической матрицы и обзор предыдущих работ, использованных для уменьшения этих потерь. Во **второй и третьей частях главы 4** обсуждается производительность неоднородного устаревшего массива PV для топологии массива SP и топологии CCO. 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 на единицу (p.u) при стандартных условиях тестирования (STC). Для всех симуляций вся фотоэлектрическая матрица работает на STC, чтобы устранить несоответствие потерь мощности из-за частичного затенения. Рассматриваются два сценария для оценки состояния старения PV-матрицы, состоящей из 40 неоднородных 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.

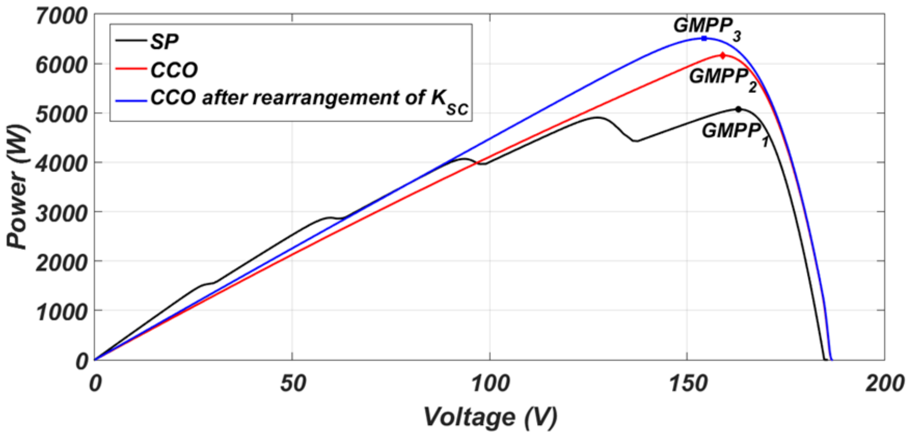
Таблица 1 Распределение факторов старения тока короткого замыкания по первому сценарию.

	Column (string)							
Row (module)	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 рис. 7 показаны кривые 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 фотоэлектрического модуля.



(a)



(б)

Рис. 7 Характеристики массива для обеих топологий по первому сценарию: (a) 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 рассогласование потерь мощности в неоднородной устаревшей топологии массива SP равно 1428 Вт. Если MPP-трекеру не удается отследить GMPP1, вводящая в заблуждение потеря мощности добавляется к вышеупомянутым потерям несоответствия. С другой стороны, топология GMPP2 для CCO расположена в координатах (159,13 В, 38,74 А) с максимальной мощностью, равной 6165 Вт. Это означает, что максимальная мощность увеличивается на 1093 Вт по сравнению с топологией массива SP. Однако имеется потеря мощности, равная 335 Вт, из-за несоответствия тока между последовательно соединенными цепями CCO.

Несоответствие тока между последовательно соединенными цепями CCO можно устранить путем физического переключения местоположения фотоэлектрических модулей из цепи CCO, которая имеет высокий K_{SC}, в цепь CCO, которая имеет низкий K_{SC}, так что все цепи CCO 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

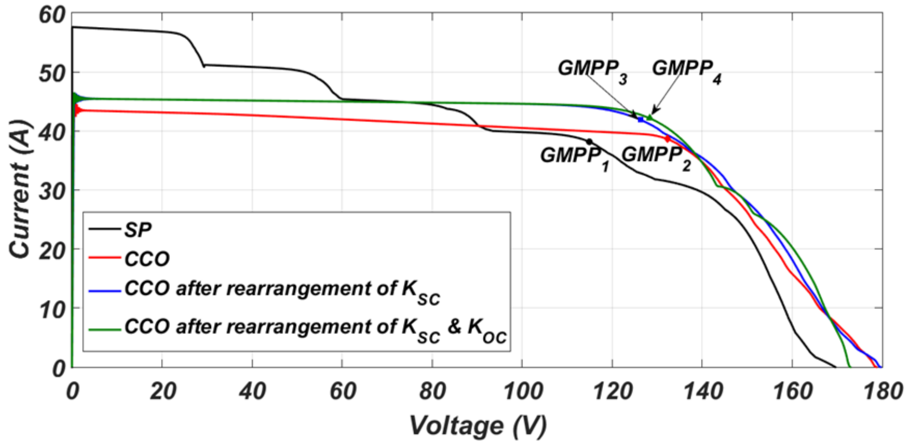
Новые координаты глобальной MPP (GMPP3) после перестановки устаревших модулей становятся (153,98 В, 42,17 А) с максимальной мощностью, равной 6493 Вт, что приблизительно соответствует ожидаемой максимальной мощности от фотоэлектрической матрицы. Анализ данных, представленных на рис. 7, позволяет сделать вывод о повышении эффективности топологии ССО с использованием подхода автономной реконфигурации. Где 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.

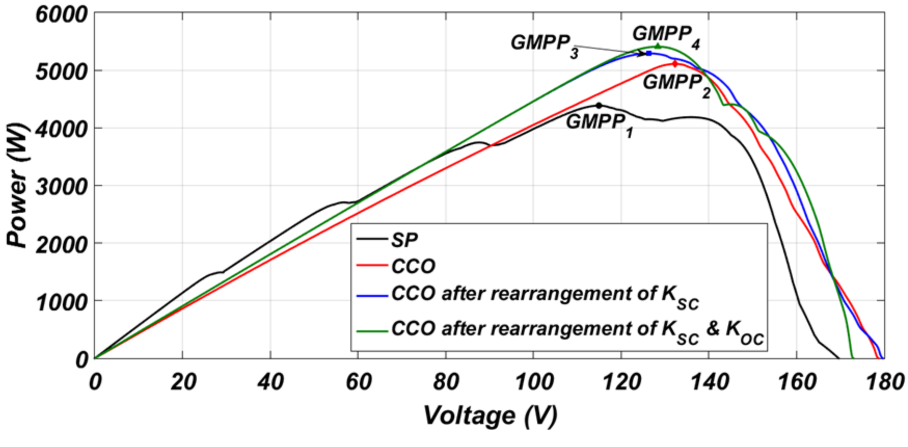
Характеристики PV для обеих топологий по второму сценарию показаны на рис. 8, где GMPP1 и GMPP2 - это MPP для топологии массива SP и топологии ССО перед любой перестройкой панелей PV. GMPP1 расположен в точке с координатами (114,93 В, 38,16 А) с максимальной мощностью, равной 4386 Вт. В этом случае рассогласование 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 потеря 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



(а)



(б)

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

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

Если фотоэлектрические модули перемещены таким образом, чтобы все CCO 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 оптимизаторе), в то время как характеристические кривые становятся более плавными. К сожалению, среднее значение $\sum K_{OC}$, созданное всеми CCO, не удобно для отдельного напряжения MPP каждого модуля (Примечание: характеристики этого случая не показаны на рисунке 8).

Эту проблему можно решить, уменьшив разнесение K_{OC}в каждом оптимизаторе и в то же время поддерживая условие одинаковой суммы K_{SC} для всех CCO. Таблица 4 иллюстрирует одно решение для перестановки фотоэлектрических панелей таким образом, и результирующие кривые массива фотоэлектрических элементов показаны на рис. 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 перестановки K_{SC} и K_{OC} для второго сценария.

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 0.98	0.9 0.98	0.9 0.98	0.9 0.98	0.4 0.70	0.4 0.70	0.4 0.70	0.4 0.70	5.2 p.u --------	-------- 6.72 p.u
0.8 0.95	0.8 0.95	0.8 0.95	0.8 0.95	0.5 0.79	0.5 0.79	0.5 0.79	0.5 0.79	5.2 p.u --------	-------- 6.96 p.u
0.7 0.89	0.7 0.89	0.7 0.89	0.7 0.89	0.6 0.86	0.6 0.86	0.6 0.86	0.6 0.86	5.2 p.u --------	-------- 7.00 p.u
0.6 0.86	0.6 0.86	0.6 0.86	0.6 0.86	0.7 0.89	0.7 0.89	0.7 0.89	0.7 0.89	5.2 p.u --------	-------- 7.00 p.u
0.5 0.79	0.5 0.79	0.5 0.79	0.5 0.79	0.8 0.95	0.8 0.95	0.8 0.95	0.8 0.95	5.2 p.u --------	-------- 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 CCO. 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 трехфазной топологией CCO, подключенной к сети, и ее схемы управления для ввода высококачественной энергии в сеть в соответствии со стандартом IEEE 929. Принципиальная схема централизованного инвертора, подключенного к сети, на основе тока Коллектор оптимизаторов (CCO) изображен на рис. 9. Как можно видеть, фотогальванические модули суммируются CCO, а затем подключаются к сети через трехфазный двухуровневый инвертор источника напряжения (VSI). CCO 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 (MPPT). Конденсатор постоянного тока используется перед VSI и действует как временное устройство накопления энергии для обеспечения постоянного потока энергии. Для того, чтобы отслеживать напряжение MPP из CCOs, опорное напряжение звена постоянного тока (V_{dc}^*) регулируется с помощью возмущают и наблюдать (P&O) MPPT технику. VSI используется для преобразования входной мощности постоянного тока от CCO в выходную мощность переменного тока с использованием стратегии управления полностью отсоединенным током во вращающейся системе отсчета постоянного тока. Пассивный LC-фильтр используется после VSI, чтобы избавиться от нежелательных гармоник в подаваемом токе, за которым следует низкочастотный повышающий трансформатор. Коммунальная сеть моделируется эквивалентной схемой Thevenin.

Чтобы подтвердить осуществимость топологии CCO, имитируется численная модель 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 10 * 32 с обходными диодами через каждые 5 последовательных модулей, в то время как во втором сценарии массив PV укладывается в последовательные параллельные CCO 2 * 4, что эквивалентно первому сценарию. Для обоих сценариев предположим, что 25% подстрок освещены на 0,6 кВт/м^2, а остальные фотоэлектрические модули полностью освещены при постоянной температуре 25 °C. На рис. 10 показаны соответствующие P-V-характеристики двух сценариев при стандартных условиях испытаний (STC) и условиях частичного затенения (PSC). Примечание: оба сценария имеют одинаковые характеристики в STC.

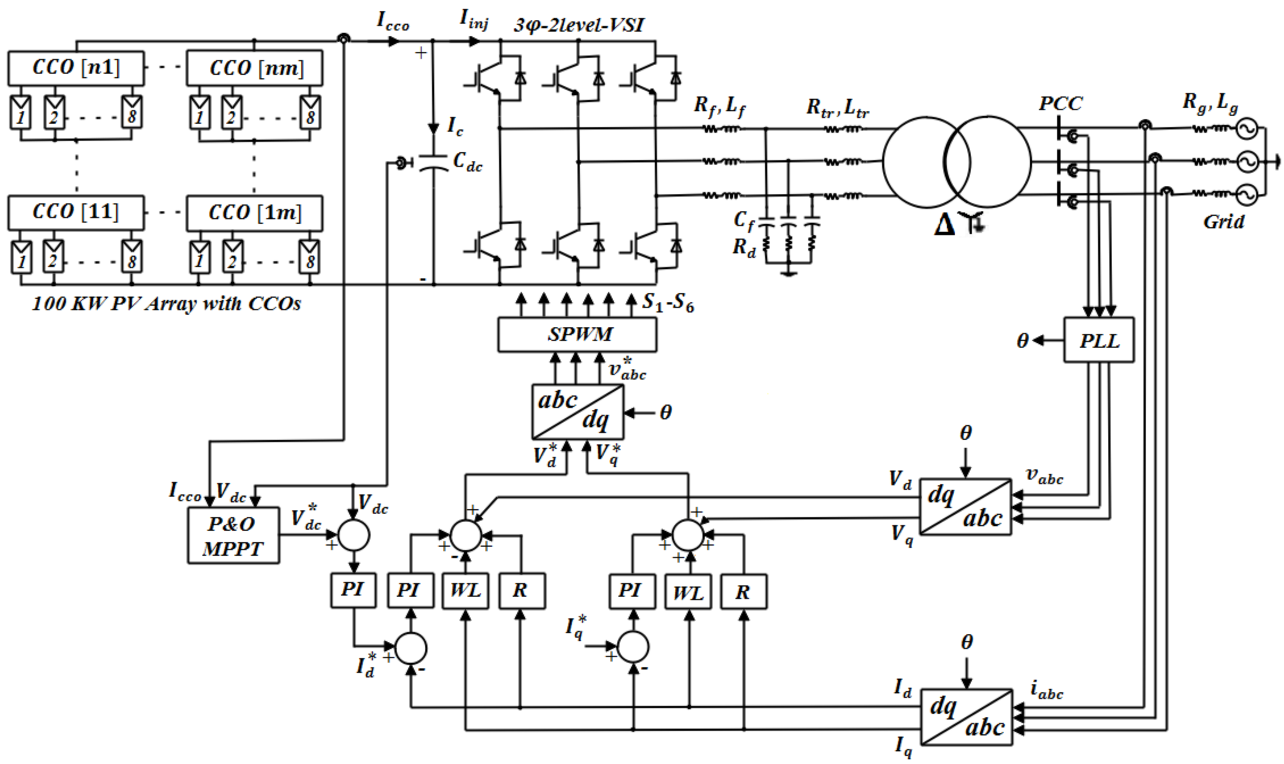


Рис. 9 Принципиальная схема подключенных к сети топологии CCO.

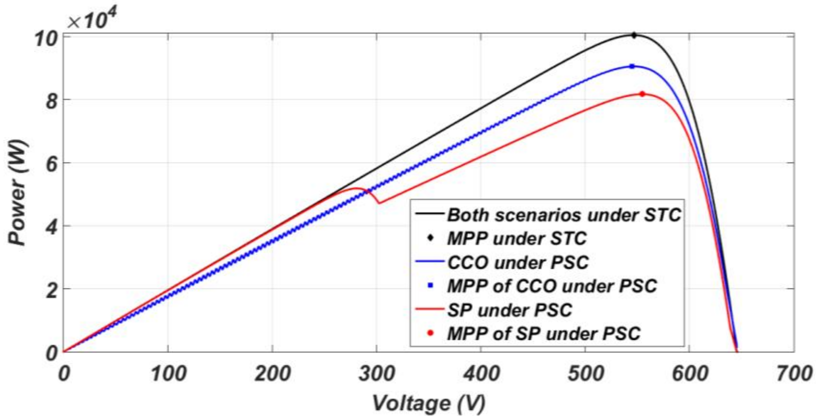


Рис. 10 P-V характеристики обоих сценариев при STC и PSC.

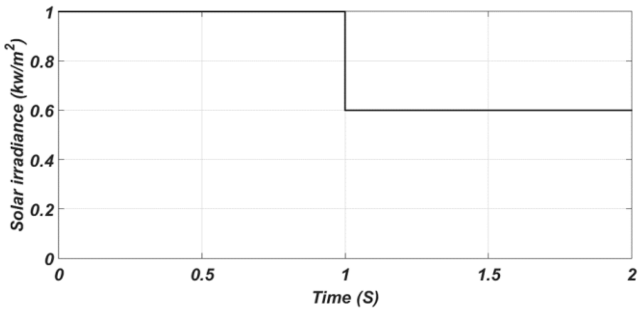
Как видно из рис. 10, в случае топологии массива SP, характеристики PV показывают несколько MPP, которые увеличивают вероятность ложного отслеживания MPP. С другой стороны, в случае CCO характеристики P-V имеют уникальный MPP, за которым легко следовать простым алгоритмом MPPT. Максимальные мощности, генерируемые в случае STC, затененного CCO 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, динамическое моделирование выполняется с частичной тенью, обсуждавшейся ранее для 25% подстрок, как показано на рис. 11 (а). На рис. 11 (б) и (в) показана выходная мощность заштрихованных и незаштрихованных подстрок во время прогона моделирования. Как видно, уровень облучения упал на 1 секунду и оказывает непосредственное влияние на выходную мощность подстроки. Величина напряжения на конденсаторах связи CCO снижается, чтобы компенсировать эту ситуацию частичного затенения и собирать общую мощность от затененных и не затененных подстрок при напряжении приблизительно MMP. Напряжение на верхних конденсаторах является таким, как показано на фиг.11 (г), в то время как напряжение на нижних конденсаторах находится в противофазе с верхними конденсаторами. Общий выходной ток из всех стеков CCO (I_{CCO}) под PSC показан на рис. 11 (д). Общий ток, собираемый CCO, первоначально составляет 184,3 А, а затем падает до 165,5 А после частичного затенения.

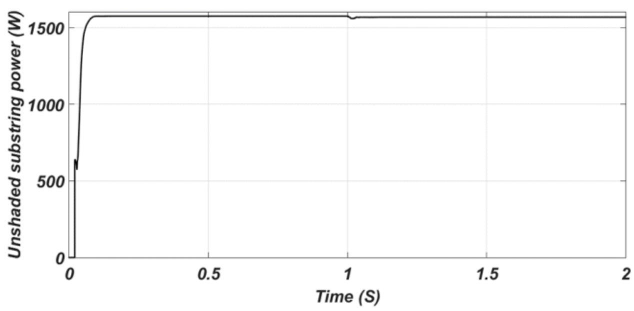
Напряжение звена постоянного тока контролируется, чтобы проверить работу контроллера напряжения звена постоянного тока и убедиться, что он отслеживает напряжение MPP в соответствии с PSC. Как показано на рис. 11 (е), напряжение в звене постоянного тока продолжало отслеживать MPP, обеспечиваемый алгоритмом P & O, и снижалось с 547 В до 545 В. Напряжение звена постоянного тока контролируется для проверки работы контроллера звена постоянного тока. Компоненты постоянного тока подаваемого тока показаны на рис. 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 Рис. 11 (ж) и Рис. 11 (з) соответственно. Как и ожидалось, форма волны напряжения сети не изменяется во время переходного процесса, поскольку она задается сетью переменного тока, тогда как амплитуда тока сетки уменьшается в ответ из-за частичной тени. Как видно на рис. 11 (з), регулятор тока предлагает быстрый динамический отклик. Для получения установившегося тока потребовалось около 0,02 секунды или один цикл после частичного затенения. На фиг.11 (и) показано смещение фазы (угол) между фазным током и фазовым напряжением на PCC при PSC (то же самое для других фаз), где ток сетки находится в фазе с напряжением сети (то есть работа с единичным коэффициентом мощности).

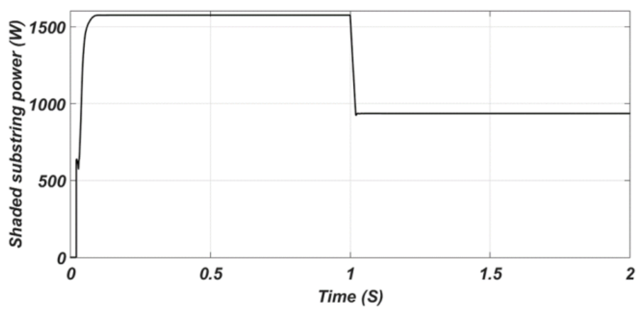
Активная и реактивная мощность, передаваемая в сеть в PCC, показана на рис. 11 (й). Активная мощность первоначально составляет 100 кВт, а затем снижается до 90 кВт после того, как происходит частичное затенение, в то время как реактивная мощность, подаваемая в сеть, поддерживается на нулевом значении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


Solar irradiance (kw/m2)
Time (S)

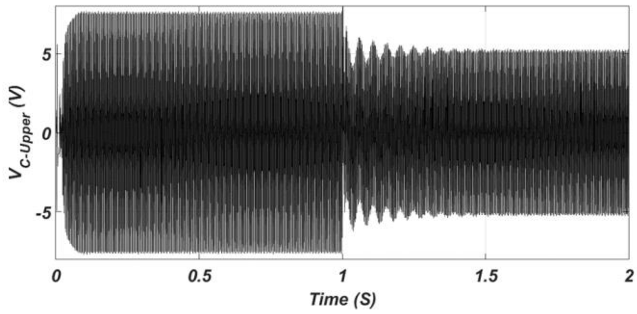
(а)


Unshaded substring power (W)
Time (S)

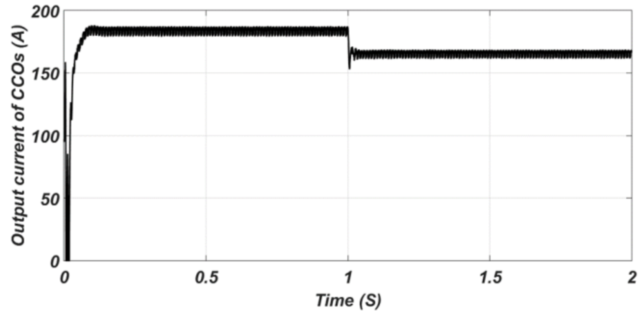
(б)


Shaded substring power (W)
Time (S)

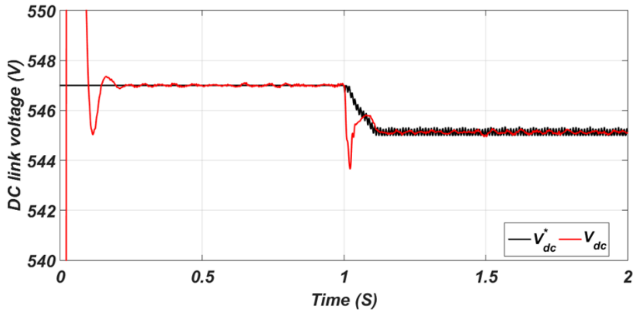
(в)


VC-Upper (V)
Time (S)

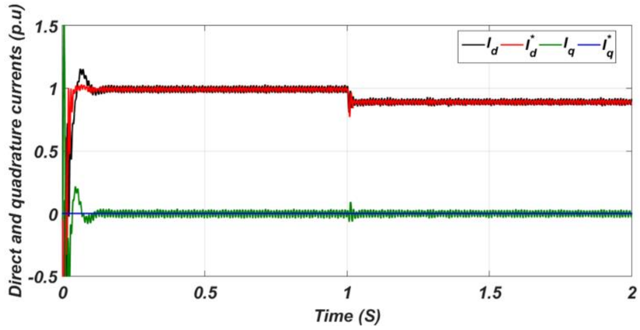
(г)


Output current of CCOs (A)
Time (S)

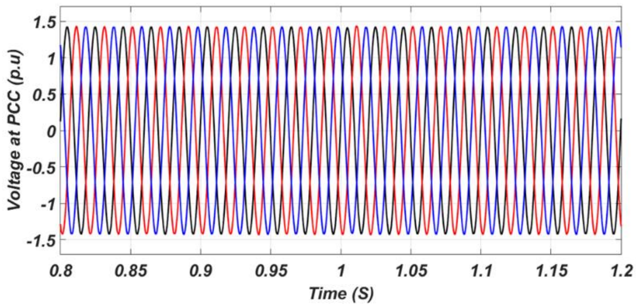
(д)


DC link voltage (V)
Time (S)
V*dc
Vdc

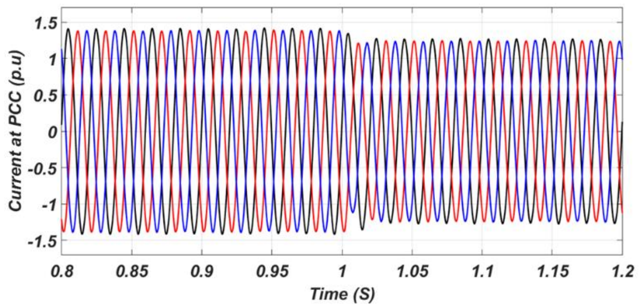
(е)

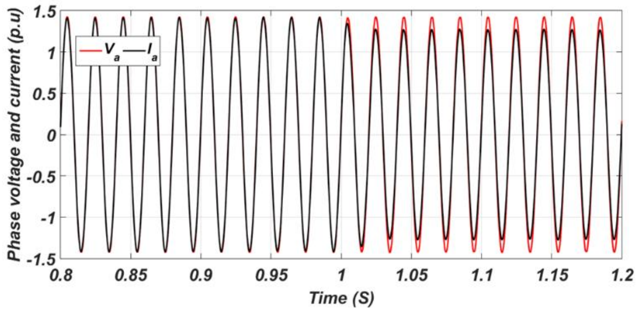

Direct and quadrature currents (p.u)
Time (S)
Id
I*d
Iq
I*q

(ё)

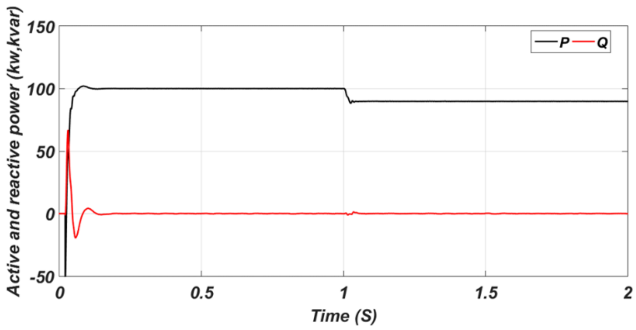

Voltage at PCC (p.u)
Time (S)

(ж)

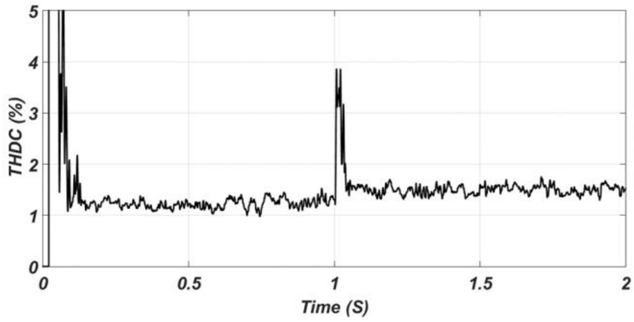

Current at PCC (p.u)
Time (S)


Phase voltage and current (p.u)
Time (S)
Va
Ia

(з) (и)



(й)



(к)

Рис. 11 Результаты моделирования под PSC.

Согласно результатам моделирования, предложенная стратегия управления для трехфазной топологии CCO, 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 (то есть работа с единичным коэффициентом мощности). Следовательно, производительность системы соответствует стандарту IEEE 929. Кроме того, максимальная мощность, генерируемая с использованием топологии CCO, значительно увеличивается по сравнению с обычной топологией массива SP при условии частичного затенения.

Глава 6 представляет собой краткое изложение и вывод основных моментов, полученных в этом тезисе, и возможные дополнения к будущей работе.

Заключение

Эта работа была сосредоточена на улучшении производительности централизованной инверторной технологии для приложений, подключенных к сети. Цель состояла в том, чтобы создать новую топологию централизованного инвертора, подключенного к сети, на основе нового фотоэлектрического оптимизатора токосъемника (CCO), чтобы повысить выходную мощность от фотоэлектрической матрицы в случае частичного затенения или несоответствия, а также ввести высококачественную мощность в сетка для соответствия стандарту IEEE 929. Основные результаты исследования можно резюмировать следующим образом:

1. Используя топологию CCO, электрические характеристики фотоэлектрической матрицы были улучшены с помощью плавных кривых и уникального MPP даже в условиях частичного затенения или неравномерного старения.

2. Локальные MPP, которые были обнаружены в случае топологии массива SP, были успешно устранены путем использования цепей CCO.

3. Вводящие в заблуждение потери мощности были ликвидированы для частично затененных или неравномерно состаренных фотоэлектрических матриц.

4. Топология ССО позволяет нам использовать простой алгоритм MPPT для отслеживания MPP.

5. Разность напряжений между параллельными фотоэлектрическими генераторами; из-за частичного затенения или несоответствия условия компенсируются посредством оптимизации до текущей точки консолидации. Следовательно, циркуляционные токи между параллельными фотоэлектрическими генераторами исключаются.

6. В условиях частичного затенения потеря несоответствия мощности существенно снижается, а также повышается энергоэффективность за счет использования топологии ССО.

7. Проблема неравномерного старения среди последовательно соединенных фотоэлектрических модулей была решена без замены устаревших модулей новыми. Топология ССО используется для увеличения сбора энергии от неоднородных фотоэлектрических модулей старения. Оптимальная мощность достигается, если ток короткого замыкания используется для оценки процесса старения, тогда как близкая к оптимальной мощность достигается, когда ток короткого замыкания и напряжение холостого хода используются для оценки процесса старения.

8. Результаты моделирования топологии ССО, связанной с сетью, показывают, что предложенная методология управления предлагает превосходный устойчивый отклик, быстрый динамический отклик, низкое значение THD тока, единичный коэффициент мощности, идеальное и надежное отслеживание MPP. Следовательно, производительность системы соответствовала стандарту IEEE 929.

Основные публикации автора по теме диссертации

Публикации в научных журналах из списка ВАК:

[1] Refaat A., Elgamal M., and Korovkin N.V., “A Novel Grid-Connected Photovoltaic Centralized Inverter Topology to Improve the Power Harvest during Partial Shading Condition”, Elektrichestvo, 7, pp. 59-68, 2019.

[2] Refaat A., Osman M. H., and Korovkin N. V., “Optimum power extraction from non-uniform aged PV array using current collector optimizer topology”, Elektrichestvo, 10, pp. 54-60, 2019.

Публикации на английском языке, индексируемые в база (Scopus, Web of Science):

[3] Refaat A. and Korovkin N., “A new photovoltaic current collector optimizer to enhance the performance of centralized inverter topologies”, Int. Scie. Conf. Energy, Man. of Municipal Trans. Facilities and Transport EMMFT"2018, Advances in Intelligent Systems and Computing 982 (l) ed. Murgul V. and Pasetti M. Springer, Cham, pp 216-24, 2020.

[4] Refaat A., Elgamal M., and Korovkin N. V., “A Novel Photovoltaic Current Collector Optimizer to Extract Maximum Power during Partial Shading or Mismatch Conditions”, IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 407-412, 2019.

[5] Refaat A., and 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, 643 (1), (012094), 2019.

[6] Refaat A., Osman M. H., and Korovkin N. V., "Current Collector Optimizer Topology to Extract Maximum Power from Non-Uniform Aged PV Array", Energy, vol. 195, (116995), 2020.

[7] Osman M. H., and Refaat A., "Adaptive multi-variable step size P&O MPPT for high tracking-speed and accuracy", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 643 (1), (012050), 2019.

[8] Refaat A., Shehata A. A., Elgamal M., and 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 (Принято к публикации).

[9] Elgamal M., Korovkin N.V., Refaat A., and Elmitwally A., "An Optimal Day-Ahead Operation Strategy for Hybrid Energy Microgrid", IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus), pp. 489-494, 2019.

[10] Elgamal M., Korovkin N.V., Refaat A., and Elmitwally A., "Optimal operation of a hybrid-energy Microgrid with battery storage", E3S Web of Conferences, vol. 138, (01003), pp. 1-10, 2019.

[11] Shehata A. A., Refaat A., Ahmed M. K., and Korovkin N. V., "Optimal Placement and Sizing of FACTS Devices Based on Autonomous Groups Particle Swarm Optimization Technique", Archives of Electrical Engineering, 2020 (Принято к публикации).

[12] Shehata A. A., Refaat A., and 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 technologies (FarEastCon), 2020 (Принято к публикации).