

УДК 621.311.1.001.24

DOI: 10.53297/18293328-2025.1-59

СОЛНЕЧНАЯ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯ С ЭЛЕКТРОМАШИНЫМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ - ИНВЕРТОРОМ

Ж.Д. Давидян, М.Г. Тамразян

Национальный политехнический университет Армении

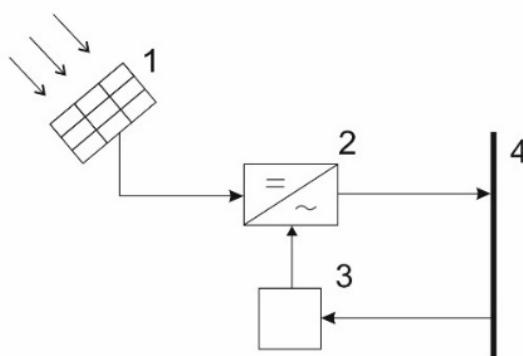
Вольтаические солнечные электростанции выполняются в основном по структурной схеме последовательного соединения солнечных панелей и полупроводникового инвертора. Солнечные панели представляют собой полупроводниковые устройства, которые предназначены для преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию постоянного тока. Инвертор представляет собой полупроводниковый коммутатор, который предназначен для преобразования постоянного тока и напряжения солнечных панелей в переменный ток и напряжение с частотой сети. Величина тока и напряжения на выходе панелей зависит от интенсивности солнечного облучения панелей и в зависимости от природных условий изменяется от нуля до максимальной. Это нерегулярное напряжение постоянного тока с выхода панелей посредством инвертора преобразуется в регулируемое напряжение переменного тока, соответствующее напряжению и частоте сети, по форме, приближенной в определённой степени к синусоидальной. Инвертор регулируется таким образом, что генерированная солнечными панелями электрическая энергия полностью или в заданной степени передаётся в электрическую сеть. Солнечные электростанции, выполненные по указанной схеме, обладают следующими недостатками, обусловленными коммутационным характером преобразования полупроводникового инвертора:

- несинусоидальность формы выходного напряжения;
- неустойчивость в перегрузочных и переходных режимах;
- ограниченные пределы регулирования реактивного тока;
- ограниченные пределы генерации электроэнергии.

В предлагаемом техническом решении указанные недостатки исключены вследствие использования вместо полупроводникового коммутационного инвертора электромашинного преобразователя-инвертора, выполненного в виде последовательно соединённых по валу двигателя постоянного тока и синхронного генератора. Обмотка якоря двигателя постоянного тока соединена с выходом солнечных панелей, а обмотка якоря синхронного генератора соединена с сетью. Регулятор активной мощности соединён с обмоткой возбуждения двигателя постоянного тока, а регулятор реактивной мощности соединён с обмоткой возбуждения синхронного генератора.

Ключевые слова: вольтаические солнечные электростанции, инверторы напряжения, инверторы тока, коэффициент искажения формы напряжения, частотный спектр напряжения инвертора.

Структура и характеристики вольтаических солнечных электростанций. Вольтаические солнечные электростанции преобразуют энергию солнечного излучения непосредственно в электрическую энергию, в подавляющем большинстве случаев работают параллельно с электрической сетью и всю выработанную электроэнергию передают в электрическую сеть [1, 2]. Структурная схема вольтаической солнечной электростанции приведена на рис. 1. (Вольтаические солнечные электростанции иначе называются фотоэлектрическими.)



*Рис. 1. Структурная схема вольтаической солнечной электростанции:
1 – солнечные панели, 2 – инвертор, 3 – регулятор мощности, 4 – электрическая сеть*

Вольтаическая солнечная электростанция (рис. 1) состоит из солнечных панелей и полупроводникового инвертора. Выход солнечных панелей соединён со входом инвертора. Выход инвертора соединён с электрической сетью.

Солнечные панели представляют собой полупроводниковые устройства, которые предназначены для преобразования энергии солнечного излучения в электроэнергию.

Инвертор [3, 4] представляет собой полупроводниковый коммутатор, который предназначен для преобразования постоянного тока и напряжения солнечных панелей в переменный ток и напряжение с частотой сети. Инвертор солнечной электростанции в своём составе имеет устройство, предназначенное для обеспечения формы его выходного напряжения, в определённой степени приближенной к синусоидальной, а также устройство, предназначенное для

передачи в сеть электрической энергии, генерированной солнечными панелями.

Величина тока и напряжения на выходе панелей зависит от интенсивности солнечного облучения панелей и в зависимости от природных условий изменяется от нуля до максимальной. Это нерегулярное напряжение постоянного тока с выхода панелей посредством инвертора преобразуется в регулируемое напряжение переменного тока по форме, приближенной к синусоидальной, с частотой сети. Инвертор регулируется таким образом, что генерированная солнечными панелями электрическая энергия полностью или в заданной степени передаётся в электрическую сеть.

Солнечная электростанция может работать также в автономном режиме, будучи отсоединённой от сети, питая отдельную автономную нагрузку.

Вольтаическая солнечная электростанция обладает недостатками, которые вызваны тем, что преобразование напряжения постоянного тока с выхода солнечных панелей в напряжение переменного тока выполняется коммутационным преобразованием посредством **полупроводникового коммутационного** инвертора.

К этим недостаткам относятся:

1. Несинусоидальность формы выходного напряжения.

Выходное переменное напряжение формируется полупроводниковым инвертором посредством коммутационного преобразования напряжения постоянного тока солнечных панелей на входе инвертора в переменное напряжение на его выходе. Форма выходного напряжения инвертора несинусоидальна [3]. С помощью дополнительных устройств (например, фильтров или модуляторов) форма выходного напряжения приближается к синусоидальной – в той или иной степени. Степень приближения формы напряжения к синусоидальной зависит от схемы и материалозатратности указанных устройств. Так, в случае использования многоуровневого амплитудно-импульсного формирователя синусоиды (рис.2) практически всегда имеют место остаточные искажения, и форма выходного напряжения на выходе электростанции отличается от синусоидальной. В спектре выходного напряжения присутствуют высокочастотные гармонические составляющие. При подключении электростанции к сети высшие гармонические составляющие несинусоидального напряжения инвертора создают протекание высокочастотных токов в трансформаторах и линиях, соединяющих электростанцию с сетью. Эти токи создают дополнительные потери, снижают коэффициент полезного действия (КПД) электростанции и системы и создают высокочастотные помехи у потребителя.

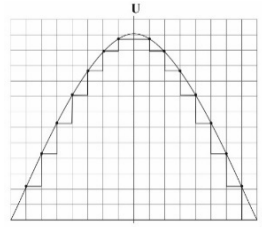


Рис.2. Форма выходного напряжения многоуровневого амплитудно-импульсного формирователя синусоиды в вольтажеской солнечной электростанции

2. Неустойчивость в перегрузочных и переходных режимах.

Солнечные панели генерируют электрический ток. Коммутация тиристорных инверторов и формирование переменного напряжения на выходе возможны до определённой предельной величины коммутируемого тока. Величина этого предельного тока определяется параметрами и материалозатратностью инвертора. При превышении тока электростанции сверх этой предельной величины (даже в течение нескольких микросекунд) происходит срыв коммутации, короткое замыкание инвертора и отключение электростанции от сети. В сети возможны неаварийные кратковременные провалы напряжения и перегрузки, которые приводят к переходным кратковременным повышениям тока. При этом, в связи с указанной особенностью тиристорных инверторов, в определённых, неаварийных для сети режимах происходит отключение инвертора и солнечной электростанции от сети. Это приводит к динамическому дефициту генерируемой мощности, дополнительной перегрузке прочих генераторов, снижению напряжения в энергосистеме и лавинообразному отключению прочих генераторов энергосистемы – вплоть до аварийного “развала” системы. Таким образом, солнечная электростанция неустойчива к определенным перегрузочным и переходным режимам в сети, что может привести к аварийным состояниям в энергосистеме.

3. Ограниченные пределы регулирования реактивного тока.

Соотношение активной и реактивной составляющих в выходном токе солнечной электростанции однозначно определяется следующими заданными параметрами: уровнем напряжения сети, величиной и характером нагрузки сети, величиной тока, генерированной солнечными панелями. Поэтому при заданном активном токе панелей и текущих параметрах сети величина реактивного тока, передаваемого электростанцией в сеть, нерегулируема или может регулироваться лишь в ограниченных пределах.

4. Ограниченные пределы генерации электроэнергии.

Надёжная коммутация тириستоров (или силовых транзисторов) полупроводникового инвертора и, соответственно, устойчивая работа инвертора воз-

можно, если напряжение постоянного тока на входе инвертора не ниже определённой критической величины. Иначе – полупроводниковый инвертор может устойчиво работать при солнечном облучении панелей, которое не ниже определённой критической величины. Следовательно, существует определённый порог солнечного излучения, лишь выше которого возможна генерация электроэнергии. Наличие такого порога приводит к отсутствию генерации электроэнергии при восходящем или заходящем Солнце. Величина указанного порога напряжения составляет порядка 30...50% от номинального входного напряжения [5]. Потеря генерации электроэнергии с учётом амплитуды входного напряжения составляет величину порядка 10...20% от энергии суточного излучения.

Предлагаемая новая схема солнечной электростанции. В работе предложена новая схема вольтаической солнечной электростанции, где исключены вышеуказанные недостатки, присущие традиционным вольтаическим солнечным электростанциям [6].

В предлагаемой солнечной электростанции указанные недостатки исключены за счет использования вместо полупроводникового коммутационного инвертора электромашиного преобразователя-инвертора, выполненного в виде последовательно соединённых по валу двигателя постоянного тока и синхронного генератора с необходимыми регулируемыми устройствами.

Схема предлагаемой солнечной электростанции приведена на рис.3.

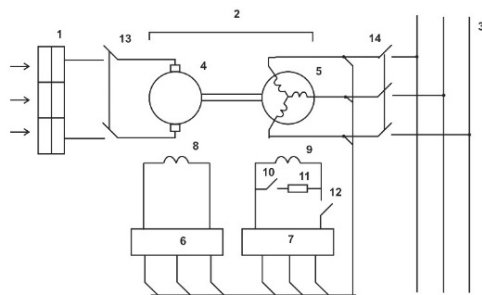


Рис.3. Схема солнечной электростанции с электромашиным преобразователем-инвертором:

1 – солнечные панели, 2 – инвертор, 3 – электрическая сеть, 4 – двигатель постоянного тока, 5 – синхронный генератор, 6 – регулятор активной мощности, 7 – регулятор реактивной мощности, 8 – обмотка возбуждения двигателя постоянного тока, 9 – обмотка возбуждения синхронного генератора, 10 – выключатель, шунтирующий обмотку возбуждения генератора, 11 – разрядное активное сопротивление, 12 – выключатель регулятора реактивной мощности, 13 – выключатель постоянного тока, 14 – выключатель переменного тока

Солнечные панели 1 предназначены для преобразования энергии солнечного излучения в электрическую энергию постоянного тока и напряжения,

Инвертор 2 предназначен для преобразователя постоянного тока и напряжения с выхода солнечных панелей в переменный ток и напряжение с частотой сети 3 на выходе электростанции. Инвертор выполнен в виде электромашиного преобразователя, состоящего из двигателя постоянного тока 4, синхронного генератора 5, регулятора активной мощности 6 и регулятора реактивной мощности 7.

Двигатель постоянного тока 4 предназначен для преобразования электрической энергии постоянного тока и напряжения с выхода солнечных панелей в механическую энергию вращения вала двигателя-генератора. Двигатель постоянного тока соединён по валу с синхронным генератором.

Синхронный генератор 5 предназначен для преобразования механической энергии вращения вала двигателя-генератора в электрическую энергию переменного тока и напряжения с частотой сети, которая передаётся в электрическую сеть.

Регулятор активной мощности 6 предназначен для регулирования активной мощности, передаваемой от солнечных панелей в сеть, посредством регулирования тока возбуждения в обмотке возбуждения 8 двигателя постоянного тока.

Регулятор реактивной мощности 7 предназначен для регулирования реактивной мощности, передаваемой в сеть, посредством регулирования тока возбуждения в обмотке возбуждения 9 синхронного генератора.

Выключатели 10, 12 и разрядное активное сопротивление 11 предназначены для выполнения асинхронного пуска синхронного генератора от сети.

Выключатели 13, 14 предназначены для подключения электростанции к сети или отключения электростанции от сети.

Электростанция работает следующим образом.

В электростанции, отключённой от сети, выключатели 13, 14, 10, 12 должны быть отключены.

Для пуска электростанции и подключения её к сети должны быть выполнены следующие операции в указанной ниже последовательности.

1. Включить выключатель 10. При этом обмотка возбуждения синхронного генератора замыкается накоротко через разрядное активное сопротивление 11. Тем самым синхронный генератор подготавливается к пуску от сети в режиме асинхронного пуска и самосинхронизации.

Разрядное сопротивление 11 может быть исключено в случае, если внутреннее сопротивление обмотки возбуждения достаточно велико и обеспечивает асинхронный пуск генератора.

2. Включить выключатель 14. При этом происходит асинхронный пуск синхронного генератора от сети с ненагруженным двигателем постоянного тока на валу. При подходе скорости генератора к синхронной выполнить п.3.

3. Включить выключатель 12, после чего отключить выключатель 10. При этом синхронный генератор переходит из пускового режима в установившийся двигательный режим синхронного генератора при холостом ходе при синхронной скорости вращения с двигателем постоянного тока на валу с возбуждением от регулятора реактивной мощности 7.

4. Включить выключатель 13. При этом обмотка якоря вращающегося двигателя постоянного тока получает электропитание постоянным током и напряжением с выхода солнечных панелей, и на валу возбуждённого двигателя постоянного тока создаётся вращающий момент, который по валу передаётся синхронному генератору. Этот вращающий момент создаёт опережение угла сдвига оси ротора синхронно вращающегося синхронного генератора относительно оси вектора поля статора (так называемого “угла нагрузки”). Это приводит к генерации синхронным генератором электрической активной мощности, которая передаётся в электрическую сеть. Генератор переходит в установившийся генераторный режим работы при синхронной скорости при частоте и напряжении сети.

Величина мощности постоянного тока и вращающего момента, созданного двигателем постоянного тока при синхронной скорости, равна электрической активной мощности, выработанной солнечными панелями при их облучении Солнцем с учётом потерь.

Величина активной мощности, выработанной синхронным генератором и переданной в сеть, равна мощности постоянного тока двигателя постоянного тока и механической мощности, переданной им по валу синхронному генератору.

Величина реактивного тока, выработанного генератором и переданного в сеть в опережающем “ёмкостном” режиме или полученного от сети в отстающем “индуктивном” режиме, определяется величиной тока возбуждения синхронного генератора. Величина тока возбуждения синхронного генератора задаётся и регулируется оператором или автоматически посредством регулятора реактивной мощности 7.

5. Для отключения электростанции отключить выключатели в следующей последовательности: сначала отключить выключатель 13, после чего отключить выключатель 14.

6. После останова двигателя-генератора (!) отключить выключатели 10 и 12.

Примечание. Синхронный генератор может быть подключён к сети также известным способом точной синхронизации с сетью. В этом случае генератор приводится во вращение двигателем постоянного тока и синхронизируется с сетью.

Реализация изложенной схемы позволяет использовать электромашинный преобразователь (рис.3) в качестве инвертора электростанции. При этом электростанция приобретает характеристики, соответствующие традиционным гидравлическим или тепловым электростанциям, в которых отсутствуют недостатки, присущие вольтаическим солнечным электростанциям. Принципиальные отличия характеристик электромашинного преобразователя (рис.3) относительно полупроводникового коммутационного инвертора вольтаической солнечной электростанции (рис.1) следующие:

- входная электрическая цепь постоянного тока не имеет электрической связи с выходной цепью переменного тока, вследствие чего возмущающие электрические воздействия из сети не проходят в первичную цепь, вызывая отключение инвертора;

- форма выходного напряжения на выходе электростанции определяется формой напряжения синхронного генератора, которая точно синусоидальна. Вследствие этого на выходе электростанции практически отсутствуют высокочастотные искажения формы напряжения и не образуются высокочастотные помехи, искажения и потери;

- выходное напряжение электростанции генерируется синхронным генератором, что обеспечивает высокую перегрузочную способность и устойчивость.

Исключение вышеуказанных недостатков вольтаических солнечных электростанций обеспечивается следующим образом (излагается по пунктам недостатков):

1. Уменьшение потерь электроэнергии и исключение высокочастотных помех.

Указанное требование обеспечивается использованием строго синусоидальной формы переменного напряжения с выхода синхронного генератора.

В отличие от полупроводникового коммутационного инвертора, в предложенной электростанции выходное напряжение генерируется электрической машиной – синхронным генератором. Синхронный генератор генерирует переменное напряжение строго синусоидальной формы. В генерированном напряжении практически полностью отсутствуют высшие гармонические составляющие, в то время как в солнечной электростанции с выходом коммутационного инвертора гармонические составляющие в определённой степени присутствуют и создают потери и помехи. В связи с этим в предложенной электростанции исключено протекание высокочастотных токов и выделение дополнительных потерь и помех в трансформаторах и линиях, соединяющих электростанцию с сетью, а также снижение КПД электростанции и системы.

2. Повышение устойчивости в перегрузочных и переходных режимах.

Электрическая машина – синхронный генератор обладает высокой перегрузочной способностью – вплоть до кратковременных перегрузок, соизмеримых с номинальной мощностью. Кроме того, перегрузочная способность синхронного генератора в режиме параллельной работы с сетью может быть повышена посредством перевозбуждения генератора. Использование синхронного генератора в качестве источника электроэнергии электростанции исключает недостаток, присущий вольтаическим солнечным электростанциям.

3. Обеспечение регулирования реактивного тока в пределах до номинального.

Синхронный генератор, работающий параллельно с сетью, обеспечивает регулирование реактивного тока в пределах до номинального как опережающего, так и отстающего, посредством регулирования его тока возбуждения.

4. Ограниченные пределы генерации электроэнергии.

Для синхронного генератора не существует порога генерации, вызванного характеристиками коммутационного инвертора.

Заключение. Предложенная схема солнечной электростанции с использованием в качестве инвертора электромашинного преобразователя в виде двигателя постоянного тока и соединённого с ним по валу синхронного генератора с необходимыми регулирующими устройствами вместо полупроводникового коммутационного инвертора обеспечивает исключение недостатков, присущих вольтаическим солнечным электростанциям, и повышение надёжности солнечных электростанций и энергосистем.

Литература

1. https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%B5%D1%87%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D0%B0%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F Солнечная электростанция.
2. <http://electrician.com.ua/posts/1041> Солнечные фотоэлектрические электростанции. Авторы: Андрей Симонов, Дмитрий Любас.
3. Давидян Ж.Д., Тамразян М.Г., Арутюнян Л.А. Анализ и выбор типа инверторов солнечных электростанций по критерию формы кривой напряжения // Вестник, НПУА: Электротехника, Энергетика.- 2022.- N 1.- С.48-65. DOI: 10.53297/18293328-2022.1-49.
4. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники: Учебник для вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высшая школа, 1980.- 424 с.
5. <https://www.solnechnye.ru/inventory-220v/ENE-N3KTL-3kW-220V.htm> Сетевой инвертор для солнечных батарей 3 кВт, 220 вольт, производства СЕНЕ. Модель: ЕНЕ-N3KTL
6. А.с. 929У (РА). Солнечная электростанция / Ж.Д. Давидян, М.Г. Тамразян.- 15.06.2023.

*Поступила в редакцию 20.05.2025.
Принята к опубликованию 31.10.2025.*

ԱՐԵՎԱՅԻՆ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՅԱՆ՝ ԷԼԵԿՏՐԱՄԵԹԵՆԱՅԱԿԱՆ ԻՆՎԵՐՏՈՐ - ՓՈԽԱՐԿԻՉՈՎ

Ճ.Դ. Դավիդյան, Մ.Գ. Թամրազյան

Վոլտային արևային էլեկտրակայանները հիմնականում պատրաստվում են արևային վահանակների և կիսահաղորդչային ինվերտորի հաջորդական միացման կառուցվածքային սխեմայի համաձայն: Արևային վահանակները կիսահաղորդչային սարքեր են, որոնք նախատեսված են արևային ճառագայթման էներգիան հաստատուն հոսանքի էներգիայի փոխակերպելու համար: Ինվերտորը կիսահաղորդչային փոխակերպիչ է, որը նախատեսված է արևային վահանակների հաստատուն հոսանքը և լարումը ցանցի հաճախականությամբ փոփոխական հոսանքի և լարման փոխակերպելու համար: Վահանակների ելքում հոսանքի և լարման մեծությունը կախված է վահանակների արևային ճառագայթման ինտենսիվությունից և, կախված բնական պայմաններից, փոխվում է զրոյից մինչև առավելագույնը: Վահանակների ելքից եկող այս անկանոն հաստատուն հոսանքի լարումը ինվերտորի միջոցով փոխակերպվում է ցանցի լարմանը և հաճախականությանը համապատասխանող կարգավորվող փոփոխական հոսանքի լարման, որի ձևը, որոշակի չափով մոտավոր, սինուսոիդային է: Ինվերտորը կարգավորվում է այնպես, որ արևային վահանակներով արտադրված էլեկտրական էներգիան ամբողջությամբ կամ որոշակի չափով փոխանցվում է էլեկտրական ցանց:

Նշված սխեմայի համաձայն պատրաստված արևային էլեկտրակայանները, կիսահաղորդչային ինվերտորի փոխակերպման կոմուտացիոն բնույթի պատճառով, ունեն հետևյալ թերությունները՝

- էլքային լարման ձևի ոչ սինուսոիդայնություն,
- անկայունություն գերձանրաբեռնվածության և անցումային ռեժիմներում,
- ռեակտիվ հոսանքի կարգավորման սահմանափակ սահմաններ,
- էլեկտրաէներգիայի արտադրության սահմանափակ սահմաններ:

Առաջարկվող տեխնիկական լուծմամբ վերը նշված թերությունները վերացվում են՝ կիսահաղորդչային կոմուտացիոն ինվերտորի փոխարեն էլեկտրական մեքենայի փոխարկիչ-ինվերտորի օգտագործման շնորհիվ, որը պատրաստված է հաստատուն հոսանքի շարժիչի և սինքրոն գեներատորի տեսքով, որոնք հաջորդաբար միացված են լիսեռի երկայնքով: Հաստատուն հոսանքի շարժիչի խարսխի փաթույթը միացված է արևային վահանակների էլքին, իսկ սինքրոն գեներատորի խարսխի փաթույթը՝ ցանցին: Ակտիվ հզորությամբ կարգավորիչը միացված է հաստատուն հոսանքի շարժիչի գրգռման փաթույթին, իսկ ռեակտիվ հզորության կարգավորիչը՝ սինքրոն գեներատորի գրգռման փաթույթին:

Առանցքային բառեր. վոլտային արևային էլեկտրակայաններ, լարման ինվերտորներ, հոսանքի ինվերտորներ, լարման ալիքային ձևի աղավաղման գործակից, ինվերտորի լարման հաճախականության սպեկտր:

A SOLAR POWER PLANT WITH AN ELECTRIC MACHINE CONVERTER – INVERTER

J.D. Davidyan, M.G. Tamrazyan

Voltaic solar power plants are mainly made according to the structural schemes of a series connection of solar panels and a semiconductor inverter. Solar panels are semiconductor devices that are designed to convert solar radiation energy into direct current electricity. The inverter is a semiconductor switch that is designed to convert direct current and voltage of solar panels into alternating current and voltage with the network frequency. The magnitude of the current and voltage at the output of the panels depends on the intensity of solar radiation of the panels and, depending on natural conditions, changes from zero to maximum. This irregular direct current voltage from the output of the panels is converted by the inverter into a regulated alternating current voltage corresponding to the voltage and frequency of the network, in shape approximated, to a certain extent, to a sinusoidal. The inverter is regulated in such a way that the electrical energy generated by the solar panels is completely, or to a specified extent transferred to the electrical network. Solar power plants made according to the specified scheme have the following disadvantages due to the switching nature of the conversion of the semiconductor inverter:

- non-sinusoidal shape of the output voltage,
- instability in overload and transient modes,
- limited boundaries of reactive current regulation,

- limited boundaries of electric power generation.

In the proposed technical solution, the above-mentioned disadvantages are eliminated due to the use of an electric machine converter-inverter, made in the form of a DC motor and a synchronous generator connected in series along the shaft, instead of a semiconductor switching inverter. The stator winding of the DC motor is connected to the output of solar panels, and the stator winding of the synchronous generator is connected to the network. The active power regulator is connected to the excitation winding of the DC motor, and the reactive power regulator is connected to the excitation winding of the synchronous generator.

Keyword: voltaic solar power plants, voltage inverters, current inverters, voltage waveform distortion factor, inverter voltage frequency spectrum.