

УДК 621.316.1

**КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ  
REACTIVE POWER COMPENSATION**

А.А. Кандыбович, Н.А. Рассоха

Научный руководитель – В.П. Счастный, к.т.н., доцент  
Белорусский национальный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь  
val.sc@mail.ru

A. Kandybovich, N. Rassokha

Belarusian national technical university, Minsk, Belarus  
Supervisor – V. Schastniy, Candidate of Technical Sciences, Docent  
Belarusian national technical university, Minsk, Belarus

*Аннотация.* В данной статье рассматриваются причины появления реактивной мощности и способы её компенсации.

*Abstract.* This article discusses the causes of reactive power and ways to compensate it.

*Ключевые слова:* реактивная мощность, компенсация реактивной мощности, линии электропередачи, распределенные энергоресурсы, солнечный инвертор.

*Keywords:* reactive power, reactive power compensation, power lines, distributed energy resources, solar inverter.

**Введение.**

Значение реактивной мощности возрастает в связи с высокими требованиями к электроэнергии со стороны многих промышленных и бытовых предприятий в энергосистеме. Реактивная мощность, являющаяся по своей природе кажущейся или мнимой мощностью, не выполняет никакой полезной работы, а просто перемещается взад и вперед по линиям энергосистемы. Системы переменного тока являются предшественниками реактивной мощности и производятся за счет индуктивных и емкостных нагрузок.

В случае индуктивных нагрузок, таких как двигатели, электрическая энергия не может быть напрямую преобразована в полезную работу (в данном конкретном случае вращение двигателя). Это связано с тем, что для преобразования электрической энергии в энергию вращения необходимо создать магнитное поле между зазорами статора и ротора двигателя. Следовательно, для создания магнитного поля необходимо использовать некоторое количество энергии. Часть мощности, которая способствует созданию магнитных и электрических полей, известна как реактивная мощность. С точки зрения эффективности реактивную мощность можно рассматривать как потерю мощности, поскольку ее роль ограничивается созданием магнитных полей и не способствует управлению нагрузкой. Тем не менее, реактивная мощность на самом деле не является потерей, поскольку она создает магнитное поле, без которого электрическая энергия в статоре не могла бы быть преобразована в энергию вращения ротора.

В случае емкостных нагрузок в цепи переменного тока заряд пластин будет создавать сопротивление току, которое зависит от частоты. Это связано с

тем, что накопленный на пластинах заряд будет сопротивляться протеканию тока, эта форма сопротивления называется емкостным реактивным сопротивлением.

Несмотря на необходимость присутствия реактивной мощности, ее избыток часто оказывает негативное влияние на состояние электрической сети. Ее присутствие увеличивает потребляемый ток при том же уровне нагрузки, что, в свою очередь, увеличивает потери, расходы на обслуживание и стоимость эксплуатации энергосистемы. Кроме того, это снижает запас устойчивости по мощности.

Управление реактивной мощностью является основой стабильности и надежности электроэнергетической системы. В РБ компенсация реактивной мощности необходима ввиду наличия весомой доли реактивной мощности в сети.

### **Основная часть.**

Реактивная мощность ЛЭП обусловлена геометрией самих проводников (в первую очередь радиусом проводника) и геометрией конфигурации проводника (расстояния между каждым проводником и землей и расстояния между проводниками). Поведение реактивной мощности линий электропередач осложняется их индуктивными и емкостными характеристиками. Как показано на рисунке 1, при малых нагрузках линии емкостной эффект доминирует, а генераторы и реактивное оборудование, связанное с передачей, должны поглощать реактивную мощность для поддержания напряжения в сети в соответствующих пределах. С другой стороны, на высокой линии нагрузки, преобладает индуктивный эффект, а генераторы, конденсаторы и другие реактивные устройства должны вырабатывать реактивную мощность. Точка баланса, в которой индуктивные и емкостные эффекты компенсируют друг друга, обычно составляет около 40% от теплового предела линии. Тепловой предел — это точка нагрузки (в МВА), выше которой реальные потери мощности в оборудовании будут вызывать перегрев и повреждать оборудование. Большинство элементов передачи (например, проводники и трансформаторы) имеют нормальные температурные пределы, ниже которых оборудование может работать неопределенно долго без потери срока службы. Эти типы оборудования также имеют один или несколько аварийных пределов, до которых оборудование может быть загружено в течение нескольких часов с минимальной потерей срока службы. Рисунок 1 также показывает, что как при низкой, так и при высокой нагрузке линии (но не при нагрузке, связанной с тепловым пределом), реактивные потери превышают реальные потери. При полной загрузке линии реактивные потери в пять раз превышают реальные потери для линии 230 кВ и в девять раз выше для линии 345 кВ. (При 50% загрузки линии коэффициенты равны два и четыре для линий 230 и 345 кВ, соответственно). Если эти потери в линии не скомпенсированы, они уменьшают количество реальной мощности, которая может быть передана от генераторов к нагрузкам. Компенсация реактивной мощности — это выработка или её потребление с помощью устройств компенсации.

Как уже упоминалось, в нормальных условиях электрооборудованию необходимо не только получать активную мощность от источника питания, но также необходимо получать реактивную составляющую мощности. При недо-

статке реактивной мощности в электросети электрооборудование не сможет создать нормального электромагнитного поля и не будет работать в номинальных условиях, а напряжение на клеммах электрооборудования оборудование упадет, что повлияет на нормальную работу. Однако реактивная мощность, подаваемая от генератора и высоковольтной линии электропередачи, не может удовлетворить потребность нагрузки. Поэтому в электросети следует установить некоторые устройства компенсации реактивной мощности, чтобы электрооборудование могло работать при номинальном напряжении.

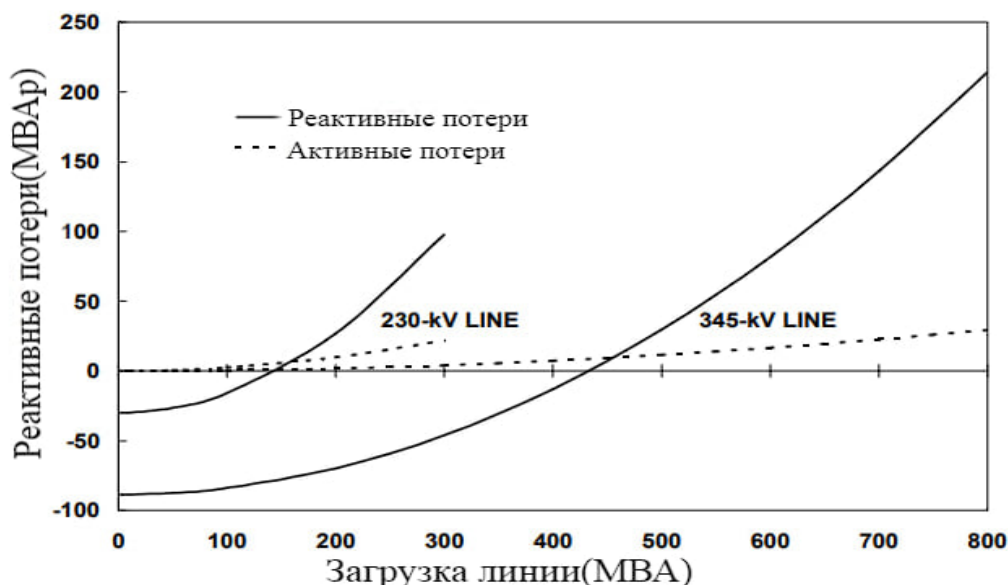


Рисунок 1 – Зависимость реактивных потерь от загрузки линии длиной 160 км

Реактивные компенсаторы относятся к устройствам с емкостной силовой нагрузкой и индуктивной силовой нагрузкой, подключенными в одной цепи. Между двумя нагрузками происходит обмен энергией. Таким образом, реактивная мощность, требуемая индуктивной нагрузкой, может быть компенсирована выходной реактивной мощностью емкостной нагрузки и наоборот.

Применению устройств компенсации реактивной мощности должен предшествовать тщательный технико-экономический анализ в связи с высокой стоимостью и достаточной сложностью этих устройств.

Чтобы увеличить коэффициент мощности индуктивной нагрузки, в нее можно добавить конденсаторы параллельно нагрузке. Значение емкости зависит от желаемой величины реактивной мощности. Включив или выключив различное количество конденсаторов, можно изменить значение ёмкости.

Компенсирующие устройства (КУ) в зависимости от места их расположения в разветвленной электроэнергетической системе подразделяются на следующие виды: индивидуальные, групповые, централизованные компенсаторы (рисунок 2).

Индивидуальная компенсация – включение конденсаторов у устройств с низким коэффициентом мощности и включение одновременно с последними.

Групповая компенсация – размещение конденсаторов у группы устройств.

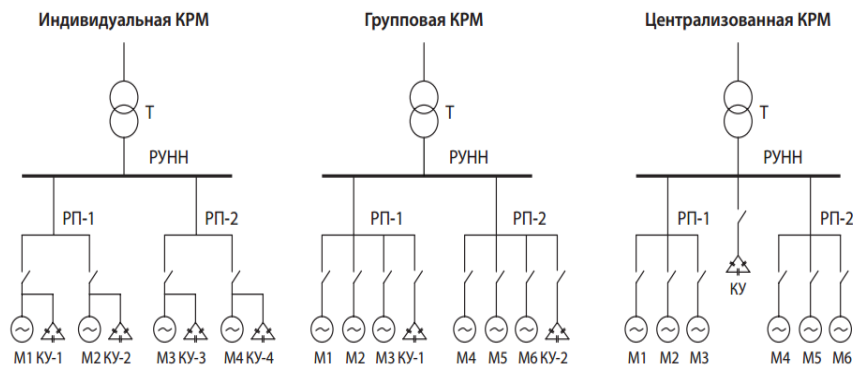


Рисунок 2. КУ в зависимости от расположения

Централизованная компенсация – предусматривает установку КУ на главном распределительном щите. Если предыдущие варианты могли быть как регулируемы, так и нет, то этот, как правило, регулируемый.

Важным моментом является соответствующее расположение компенсатора, и в особенности выбор мест подсоединения схем измерения. Компенсатор целесообразно располагать так, чтобы имелась возможность стабилизации реактивной мощности в точке подключения преобразователя. В этом случае достигается ограничение колебания напряжения в энергосистеме при изменении условий работы подключенных потребителей.

На шинах, где потребность в реактивной мощности возрастает, напряжение на шине можно регулировать, подключая конденсаторные батареи параллельно отстающей нагрузке. Конденсаторные батареи обеспечивают часть или полную реактивную мощность нагрузки, тем самым уменьшая величину тока источника, необходимого для питания нагрузки. В результате снижается падение напряжения между передающим устройством и нагрузкой, повышается коэффициент мощности и повышается выходная активная мощность от источника. В зависимости от требований нагрузки к системе могут быть постоянно подключены конденсаторные батареи или может изменяться путем включения или выключения параллельно подключенных конденсаторов вручную или автоматически. На рисунках 3, 4 показаны однопроводные схемы линии электропередачи и ее фазовая схема до добавления шунтирующего конденсатора и его фазовой схемы.

Использование шунтирующих конденсаторных батарей имеет следующие недостатки:

1. Шунтирующие конденсаторы не влияют на ток или коэффициент мощности за пределами их применения.
2. Реактивная мощность, подаваемая шунтирующими конденсаторными батареями, прямо пропорциональна напряжению на шине.
3. Когда требуемая реактивная мощность при небольших нагрузках меньше, мощность конденсаторной батареи будет высокой. Этот недостаток можно устранить, подключив несколько конденсаторов параллельно, а затем

можно изменять емкость, включая или выключая их в зависимости от требований к нагрузке.

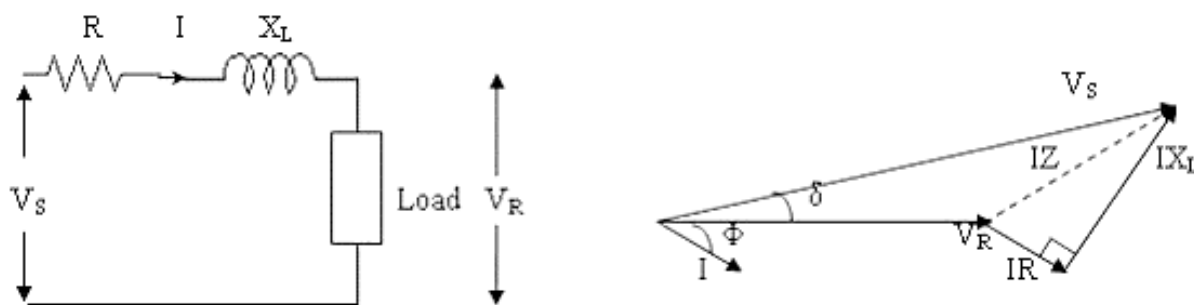


Рисунок 3. Однопроводная схема линии электропередачи без компенсации и ее фазовая схема

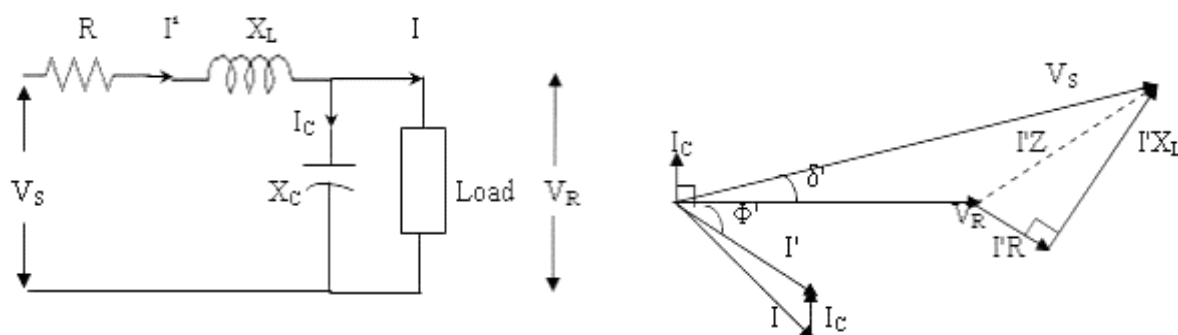


Рисунок 4. Однопроводная схема линии электропередачи с шунтирующей компенсацией и её фазовая схема

Когда линия имеет высокое значение отношения реактивного сопротивления к сопротивлению, индуктивное сопротивление линии передачи может быть уменьшено путем введения последовательных конденсаторов, что приводит к уменьшению падению напряжения. Если к линии последовательно подключить емкость "С" с реактивным сопротивлением  $X_C$ , то реактивное сопротивление будет уменьшено и, следовательно, падение напряжения уменьшится. Кроме того, реактивная мощность, потребляемая линией, также уменьшится. На рисунке 5 представлена эквивалентная схема линии с последовательной компенсацией и ее фазовая схема.

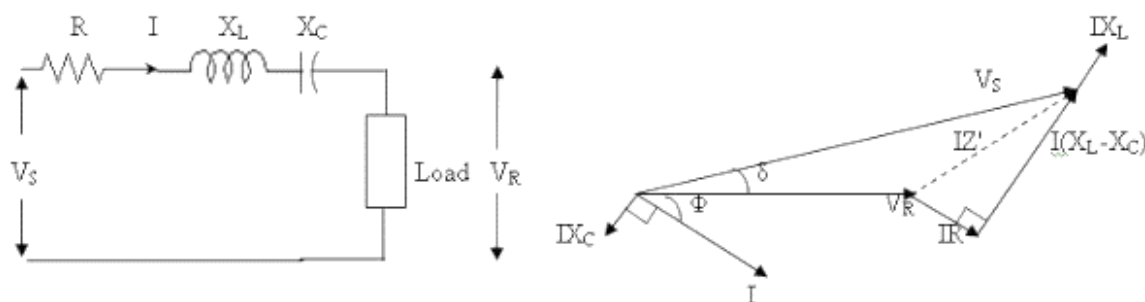


Рисунок 5. Однопроводная схема линии передачи с последовательной компенсацией и ее фазовая схема.

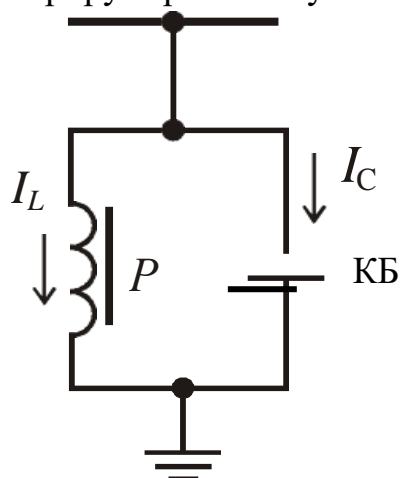
Таким образом, последовательные конденсаторы используются для уменьшения падения напряжения в линиях с низким коэффициентом мощности и повышения напряжения на приемном конце, особенно при нагрузках с низким коэффициентом мощности. В условиях переменной нагрузки напряжение может регулироваться путем включения в линию подходящих последовательных конденсаторов. При коротком замыкании высокое напряжение может привести к повреждению конденсатора, поэтому последовательный конденсатор должен быть защищен с помощью разрядника с быстродействующим контактором. Использование последовательная компенсация создает несколько проблем, таких как феррорезонанс и высокое напряжение восстановления.

Насыщающимся называется реактор, рабочий диапазон регулирования которого находится в насыщенной части его статической характеристики. Благодаря этому такой реактор можно рассматривать как параметрическое устройство для регулирования реактивной мощности. Сопротивление реактора в нелинейной части характеристики изменяется в зависимости от приложенного к нему напряжения. С увеличением напряжения ток в реакторе интенсивно возрастает, увеличивая потребляемую реактивную мощность и, тем самым, способствуя стабилизации напряжения в точке его подключения.

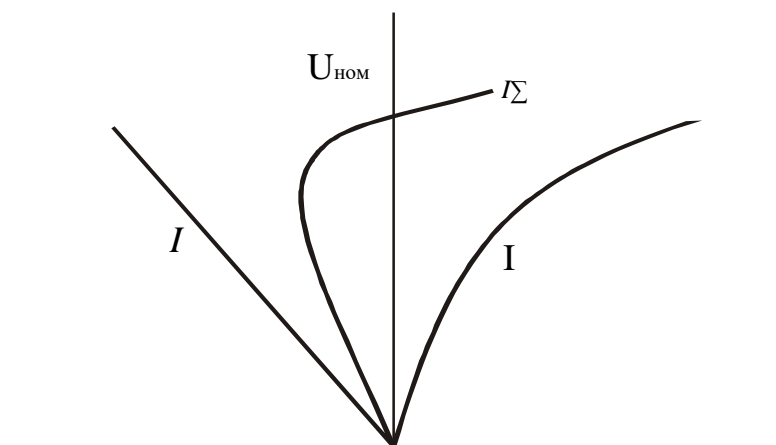
В связи с тем, что рабочий диапазон реактора находится в нелинейной части характеристики, его следует рассматривать как источник высших гармоник тока. Для их компенсации применяют сложные 6- и 9-стержневые сердечники и специальные схемы соединения обмоток. Применение таких реакторов ввиду сложности их конструкции весьма ограничено.

На рисунке 6 приведена принципиальная схема ИРМ (источник реактивной мощности) на базе такого реактора. Параметрическое регулирование обеспечивается параллельным включением КБ, как в режиме потребления, так и в режиме генерации реактивной мощности.

Мощность КБ выбирается таким образом, чтобы при номинальном напряжении суммарная мощность ИРМ была равна нулю. Тогда при увеличении напряжения выше  $U_{ном}$  источник потребляет, а при снижении ниже  $U_{ном}$  – генерирует реактивную мощность.



а



б

Рисунок 6 – Параметрический ИРМ с насыщающимся реактором  
а) – принципиальная схема; б) – статическая характеристика

Распределенные энергоресурсы (Distributed Energy Resources, DERs) - это различные технологии маломасштабного производства и хранения энергии, расположенные близко к точке потребления энергии. Эти ресурсы часто являются децентрализованными и могут быть интегрированы в электросеть на различных уровнях, включая жилые, коммерческие и промышленные объекты. Уровень распространения распределенных энергоресурсов растет и оказывает существенное влияние на стабильность напряжения в распределительных сетях. Исходя из различных типов DERs с различными характеристиками реактивной мощности, их различный вклад в стабильность напряжения в системе требует классификации. Рассматриваются и классифицируются характеристики DERs на основе характеристик реактивной мощности, чтобы исследовать различные технологии распределенной генерации для поддержки реактивной мощности в распределительных сетях.

Для подключения некоторых распределенных энергоресурсов к электросети требуется интерфейс инвертора силовой электроники, в то время как для других этого не требуется. Типичный DER с интерфейсом инвертора силовой электроники подключается параллельно нагрузке для обеспечения регулирования напряжения, как показано на рисунке 7.

Интерфейс, включающий инвертор, соединительный конденсатор постоянного тока с напряжением  $\vartheta_{dc}$  и соединительную катушку индуктивности  $L_c$ , называется компенсатором. Компенсатор подключен параллельно в точке общего подключения (PCC), напряжение PCC обозначается как  $\vartheta_t$ . Генерируя или потребляя реактивную мощность, компенсатор регулирует напряжение PCC  $\vartheta_t$ . Синхронный конденсатор подает реактивную мощность при избыточном возбуждении для повышения напряжения и поглощает реактивную мощность при недостаточном возбуждении для снижения напряжения. Регулируя напряжение возбуждения и, следовательно, изменяя реактивную мощность, которую он выдает или потребляет, синхронный конденсатор регулирует напряжение в системе.

Солнечный инвертор является одним из основных компонентов солнечной фотоэлектрической системы. В настоящее время большинство инверторов, используемых для подключения фотоэлектрических систем к электросети, работают с единичным коэффициентом мощности и, следовательно, могут выдавать фиксированное количество активной мощности в точке общего подключения (PCC) сети в зависимости от количества доступного солнечного излучения. С резким ростом использования распределенных источников энергии, основанных на возобновляемых источниках энергии (DER), реактивная мощность, потребляемая от сети, значительно возросла по сравнению с активной мощностью. Таким образом, коэффициент мощности сети, питаемой фотоэлектрической системой, использующей инверторы, подающие только активную мощность, достигнет самого низкого значения. Кроме того, для обеспечения реактивной мощности, необходимой для подключенных нагрузок, коммунальным службам необходимо устанавливать конденсаторные батареи, что усложняет эксплуатацию и увеличивает стоимость системы

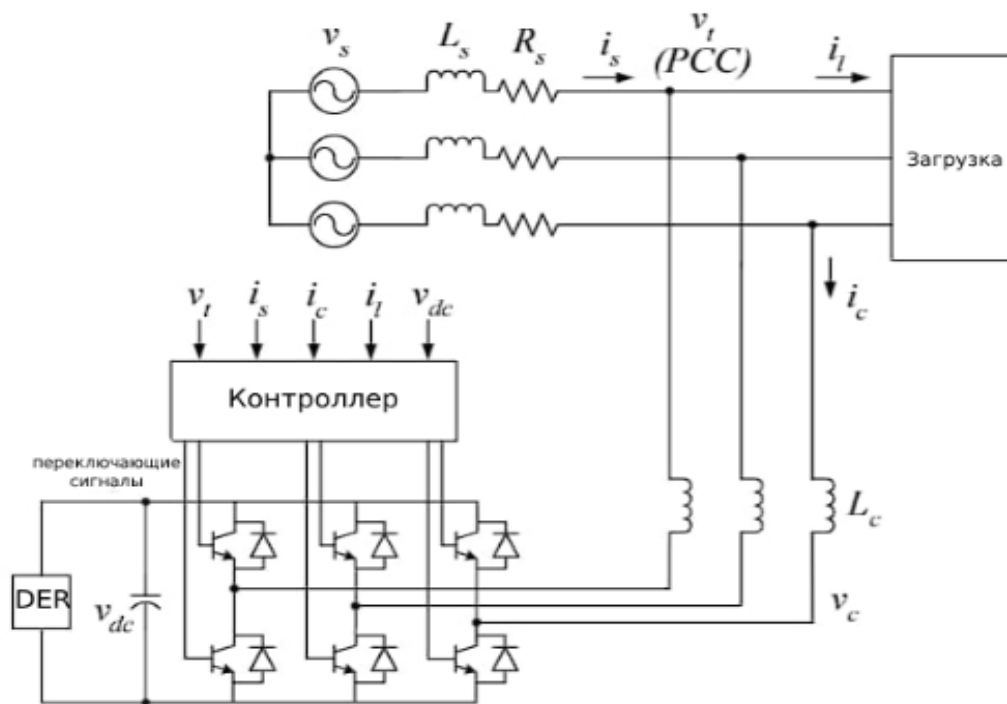


Рисунок 7 – DER с интерфейсом инвертора силовой электроники

В дополнение к вышеперечисленным моментам, солнечный инвертор не используется на полную мощность, так как мощность солнечного инвертора изменяется прямо пропорционально интенсивности солнечного излучения, которая неизменно меняется в течение дня и не остается постоянной. Это приводит к недостаточному использованию солнечного инвертора при низкой освещенности. Перечисленные выше недостатки работы солнечного инвертора при единичном коэффициенте мощности могут быть устранены путем включения в солнечный инвертор функции компенсации реактивной мощности. В дополнение к выполнению стандартных функций, солнечный инвертор с компенсацией реактивной мощности обеспечивает связь с электрической сетью и может повысить коэффициент мощности сети, а также повысить эффективность использования мощности солнечного инвертора. Интеллектуальный солнечный инвертор обладает функцией выработки реактивной мощности (как запаздывающей, так и опережающей) и может работать в различных режимах компенсации реактивной мощности.

Компания ERDA разработала технологию солнечного инвертора с компенсацией реактивной мощности (рисунок 8). Основными особенностями разработанной технологии являются:

1. Функция компенсации реактивной мощности в солнечном инверторе, подключенном к сети
2. Отслеживание точки максимальной мощности с эффективностью отслеживания более 99%
3. Надежная синхронизация с сетью, встроенный выходной изолирующий трансформатор.





Рисунок 8 – Солнечный инвертор с компенсацией реактивной мощности (5 кВА)

### **Заключение**

Реактивная мощность является как проблемой, так и решением для сети энергосистемы по нескольким причинам. Она играет важную роль в системе электроснабжения для выполнения различных функций, таких как удовлетворение потребностей в реактивной мощности, улучшение профилей напряжения, снижение потерь в сети, обеспечение достаточного резерва для обеспечения безопасности системы в чрезвычайных ситуациях и ряда других функций.

### **Литература**

1. Reactive power 2020 / Umang Karki [Электронный ресурс]/ - Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/322630449\\_Electrification\\_of\\_Subsea\\_Systems\\_Requirements\\_and\\_Challenges\\_in\\_Power\\_Distribution\\_and\\_Conversion#pf2](https://www.researchgate.net/publication/322630449_Electrification_of_Subsea_Systems_Requirements_and_Challenges_in_Power_Distribution_and_Conversion#pf2) . – Дата доступа: 11.04.2024).
2. Reactive power compensation 2016 / Kimberly Meyers, Martin Prado [Электронный ресурс]/ - Режим доступа: [https://scholarcommons.scu.edu/cgi/view-content.cgi?article=1027&context=elec\\_senior](https://scholarcommons.scu.edu/cgi/view-content.cgi?article=1027&context=elec_senior) . – Дата доступа: 11.04.2024).
3. Reactive power compensation / Joe Kaeser, Robert Kensbock [Электронный ресурс]/ - Режим доступа: <https://www.shanghaimetal.com/796-796.htm> . – Дата доступа: 11.04.2024).