

## РАЗРАБОТКА СМЕШАННОЙ АВТОНОМНОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ НА БАЗЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Докт. техн. наук, проф. ЛАОШВИЛИ Д. П.,  
докт. техн. наук КОХРЕИДZE Г. К.

*Научно-инженерный центр электроэнергетики  
Грузинского технического университета*

Надежное электроснабжение и устойчивое энергосбережение являются приоритетными направлениями государственной политики. В этой связи возрастает роль исследований и разработок возобновляемых источников питания, в частности фотоэлектрических преобразований на основе солнечных батарей. Условие максимума отбираемой мощности от батареи в целом и описание способа его реализации в условиях непостоянства параметров освещенности и нагрузки рассмотрены в [1, 2].

Наиболее важными объектами коммерческой реализации должны стать солнечные электроустановки, включаемые в общую сеть энергоснабжения. В качестве критерия целесообразности создания солнечных электростанций используется удельная стоимость модулей различных типов. Стоимость 1 кВт·ч производимой или электрической энергии зависит от объема промышленного производства модулей солнечных батарей (СБ) [3, 4].

В настоящее время наиболее перспективным направлением развития солнечной энергетики является создание тонкопленочных элементов на базе аморфного кремния и его сплавов. Основные проблемы при проектировании автономных смешанных энергосистем на базе возобновляемых источников энергии сопряжены с необходимостью эффективного накопления и хранения энергии с учетом неравномерного поступления энергии солнечной радиации и изменения КПД ее преобразования в течение суток и года (КПД СБ достигает 12–15 %).

Наиболее дорогостоящим видом накопления и хранения электрической энергии являются электрохимические аккумуляторы, электрические параметры которых должны обеспечить возможность аккумуляции электроэнергии для собственных нужд на срок не менее 3 сут. [4]. Аккумуляторную батарею характеризуют следующие параметры: емкость  $Q$ , ЭДС  $E$  и напряжение на зажимах  $U$ ; зарядное и разрядное напряжение и ток ( $U_{зар}$ ,  $U_{раз}$ ,  $I_{зар}$ ,  $I_{раз}$ ); внутреннее сопротивление  $r$  и КПД по емкости и энергии  $\eta_Q$ ,  $\eta_W$ ; время заряда и разряда  $t_{зар}$ ,  $t_{раз}$ . Для соответствующих аккумуляторных батарей заданными являются перечисленные выше параметры. Связь между этими параметрами выражается следующими формулами:

$$\left. \begin{aligned} E &= \frac{U_{зар} I_{раз} + U_{раз} I_{зар}}{I_{зар} + I_{раз}}; \quad r = \frac{U_{зар} - U_{раз}}{I_{зар} + I_{раз}}; \\ \eta_Q &= \frac{U_{зар} I_{раз} - U_{раз} I_{зар}}{U_{зар} I_{раз} - U_{раз} I_{зар}} \frac{t_{раз}}{t_{зар}}; \quad \eta_W = \frac{U_{раз} I_{раз} t_{раз}}{U_{зар} I_{зар} t_{зар}}; \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\eta_Q = \eta_W \frac{(U_{\text{зар}} I_{\text{раз}} - U_{\text{раз}} I_{\text{зар}}) U_{\text{зар}}}{(U_{\text{зар}} I_{\text{раз}} - U_{\text{раз}} I_{\text{зар}}) U_{\text{раз}}}, \quad \eta_Q > \eta_W. \quad (2)$$

На рис. 1 представлена эквивалентная схема солнечного элемента [1, 5].

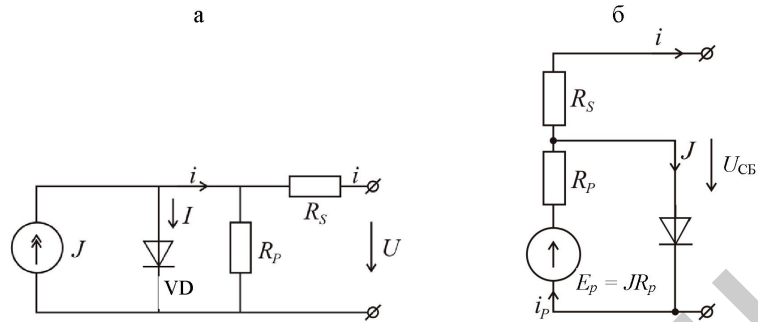


Рис. 1

Вольт-амперная характеристика солнечного элемента описывается выражением

$$i = J - I \left( e^{\frac{U}{A\varphi}} - 1 \right), \quad (3)$$

где

$$\left. \begin{aligned} I &= I_{\text{КЗ0}} - I_0 \left\{ \exp \left[ g (U - R_s I) / kT \right] - 1 \right\}; \\ \varphi &= \frac{kT}{g}; \quad E_p = JR_p, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где  $J$  – фототок, пропорциональный освещенности;  $I$  – ток насыщения электронно-дырочного перехода;  $A$  – диодный коэффициент;  $I_{\text{КЗ}}$  – совпадает с силой тока короткого замыкания панели и прямо связан с ее освещением;  $I_0$  – обратный ток фотоэлектрического преобразователя;  $g$  – заряд электрона;  $R_s$  – внутреннее сопротивление фотоэлектронной панели;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – рабочая температура. Для идеализированного случая  $R_s = 0$ ,  $R_p = \infty$  [1, 4].

Современная смешанная автономная энергосистема содержит комбинации новых типов источников энергии – фотогальванические решетчатые антенны и ветровые турбины с дизельным генератором и аккумуляторной батареей. Гибридные энергосистемы находят применения для электрификации в удаленных районах, где расходы на расширение энергосистемы являются невозможными и цены на горючее и топливо чрезвычайно высоки из-за транспортировки [5]. Авторами представлена структурная схема смешанной энергосистемы постоянного и переменного напряжения, одновременно использующей фотоэлектрические преобразователи и аккумуляторные батареи [2, 6, 7]. На рис. 2 показана разработанная авторами принципиальная электрическая схема смешанной автономной энергосистемы, состоящей из: импульсного преобразователя постоянного тока (ИППТ); солнечной батареи; аккумуляторной батареи (АБ); сети постоянного тока

(СПТ); преобразователя постоянного тока-прерывателя (ППТ); инвертора (И); однофазового согласующего силового трансформатора (Тр); высоковольтной сети переменного тока (ВС); выключателя постоянного тока (В1); выключателей переменного тока (В2, В3); нагрузок сетей постоянного и переменного напряжения (Н1, Н2).

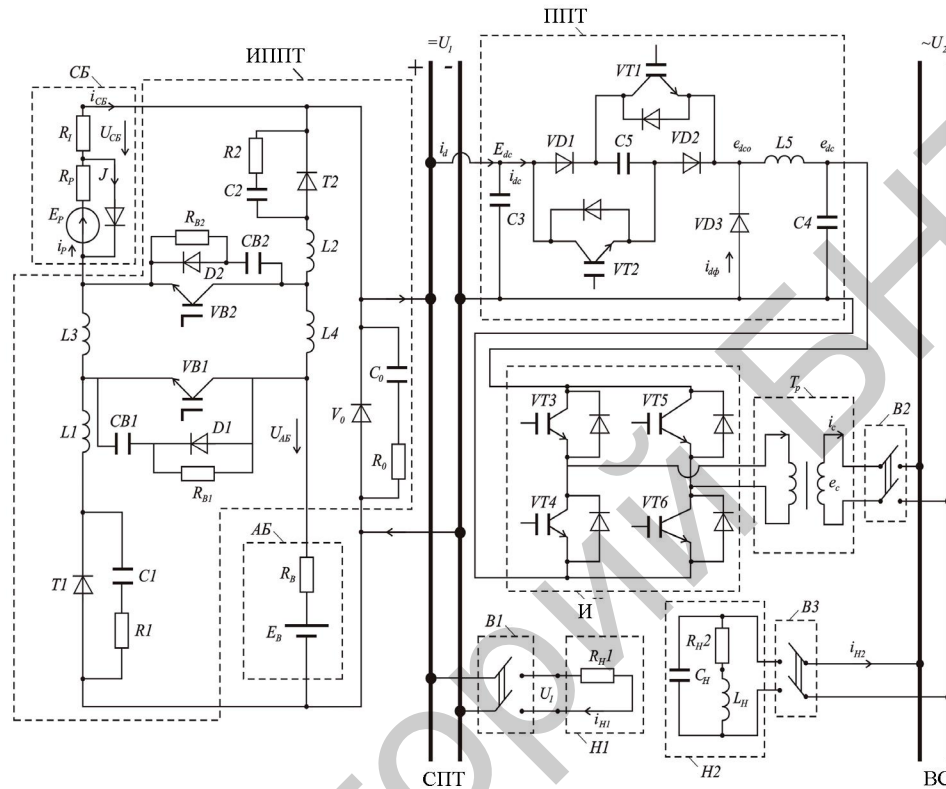


Рис. 2. Принципиальная электрическая схема смешанной автономной энергосистемы постоянного и переменного напряжения на базе возобновляемых источников энергии

ИППТ предназначен для регулирования напряжения сети  $U_1$  постоянного тока в результате бесконтактного секционирования СБ и АБ. В схеме ИППТ  $VB1, VB2$  – IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) транзисторы;  $T1, T2$  – однооперационные быстродействующие тиристоры;  $V_0$  – нулевой высокочастотный диод;  $L1, L2$  – дроссели, ограничивающие скорость нарастания токов в тиристорах  $T1, T2$ ;  $L3, L4$  – дроссели, способствующие равномерному распределению токов между транзисторами  $VB1, VB2$ ;  $R_{B1}, C_{B1}, D1, R_{B2}, C_{B2}, D2, R_K, C_K, (k = 0; 1, 2)$  демпфирующие цепочки.

При отключенных  $VB1, VB2$  и включенных  $T1, T2$  имеет место параллельное соединение СБ, АБ.

При включенных  $VB1, VB2$  имеет место последовательное соединение СБ, АБ. Кроме пересоединения СБ, АБ, транзисторы  $VB1, VB2$  осуществляют также коммутацию тиристоров  $T1, T2$  напряжением  $U_{CB}, U_{AB}$ . Для защиты тиристоров  $T1, T2$  от перенапряжений и исключения высокочастотных колебаний они зашунтированы демпфирующими цепочками  $R2C2$ .

При отключенных VB1, VB2, T2 СПТ получает питание только от СБ. В этом случае T1 находится во включенном состоянии. При отключенных VB1, VB2, T1 и включенном T2 СПТ получает питание только от АБ. Таким образом получается автоматическое бесконтактное секционирование СБ, АБ.

Общая оценка ИППТ [8]: минимальные прямые и коммутационные потери, отсутствие дополнительных коммутирующих элементов, как следствие – сочетание T1, T2 и IGBT, в результате чего ИППТ будет компактным и экономичным.

Силовые IGBT-модули заняли доминирующее положение на рынке приборов силовой электроники практически для всех видов преобразовательного оборудования мощности до единиц МВ·А. В последние годы интенсивно развивается технология прижимной конструкции IGBT-модулей, имеющих двустороннее охлаждение, низкую индуктивность выводов, высокую надежность и энерготермоциклоустойчивость [9].

Коммутируя модули СБ последовательно-параллельно, можно соответственно увеличивать или уменьшать рабочее напряжение  $U_{CB}$  и ток  $i_{CB}$ , согласуя электрические характеристики СБ с энергопотребителями.

Преобразовательные установки ППТ, И позволяют обеспечить совместную работу СБ, АБ и ВС. ППТ состоит из транзисторов VT1, VT2; диодов VD1, VD2, VD3; конденсаторов C3, C4, C5; дросселя L5. Однофазный инвертор состоит из транзисторов VT3–VT6.

ППТ обеспечивает синусоидальный выходной ток, синхронизированный с сетью переменного тока. Однофазный инвертор управляется импульсами прямоугольной формы и синхронизирован с сетью переменного тока.

В случае, когда  $E_{dc} > e_c$ , возможны три режима работы преобразовательной установки [10]:

- транзисторы VT1 и VT2 закрыты, обратный диод VD3 открыт и ток  $i_{дф}$  протекает в контуре L5 – первичная обмотка трансформатора  $T_p$ ; соответственно  $i_c$  протекает в контуре вторичная обмотка  $T_p$  – сеть переменного тока. Конденсатор C5 заряжен до напряжения  $E_{dc}$ ;
- транзисторы VT1 и VT2 открыты, а диод VD3 закрыт. Конденсатор C5 отдает накопленную энергию в сеть переменного тока, разряжаясь до нуля;
- транзисторы VT1 и VT2 закрываются, конденсатор C5 заряжается от источника входного напряжения  $E_{dc}$ . Диод VD3 открывается, когда напряжение на конденсаторе достигает значения  $e_c$ .

Таким образом, когда транзисторы VT1, VT2 закрыты, энергия накапливается в конденсаторе C5, а когда они открываются – отдается в сеть переменного тока [10].

Напряжение  $e_{dc0}$  в первом и третьем режимах равно нулю, а во втором режиме

$$e_{dc0} = E_{dc} + e_c. \quad (5)$$

IGBT транзисторы VT3–VT6 и VT4–VT5 переключаются каждые полпериода, формируя выходное напряжение и ток синусоидальной формы из мгновенных значений  $e_{dc}$  и  $i_{dc}$ . При таком управлении отсутствует задержка между переключениями транзисторов и они переключаются при нуле-

вых напряжении и токе, потери при переключениях очень малы. КПД установки при мощностях 100–700 Вт превышает 90 %, а коэффициент мощности близок к единице [10].

В дальнейшем предусмотрено математическое и компьютерное моделирование электромагнитных переходных процессов с учетом статических и динамических параметров нагрузок сетей постоянного и переменного напряжения.

## ВЫВОДЫ

1. Разработана принципиальная электрическая схема смешанной автономной параллельной энергосистемы постоянного и переменного напряжения на базе солнечной и аккумуляторной батарей.

2. Для регулирования напряжения сети постоянного тока в схеме предусмотрен импульсный преобразователь постоянного тока, с помощью которого осуществляется бесконтактное секционирование солнечной и аккумуляторной батарей.

3. Составлена схема замещения солнечной батареей и получены выражения ЭДС, внутреннего сопротивления, КПД как по емкости, так и по энергии аккумуляторной батареи в зависимости от зарядного и разрядного тока и напряжения, а также от времени заряда и разряда.

4. Для устойчивой параллельной работы сетей постоянного и переменного тока между этими сетями предусмотрено последовательное соединение преобразователя постоянного тока, инвертора и однофазного силового трансформатора.

5. Рассмотрены три основных режима работы преобразователя постоянного тока, при которых происходит накопление или отдача энергии конденсатора в сеть переменного напряжения.

6. В результате выбора ИППТ и ППТ предложенной схемы смешанной энергосистемы КПД установки превышает 90 %, а коэффициент мощности близок к единице.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Артеменко, М. Е. Оптимизация отбора мощности, генерируемой солнечной батареей / М. Е. Артеменко // Техническая электродинамика. Проблемы современной электротехники. – Киев, 2000. – Ч. 6. – С. 78–79.

2. Кохреидзе, Г. К. Система управления и контроля отбора оптимальной мощности в гибридных автономных энергосистемах с нетрадиционными источниками энергии / Г. К. Кохреидзе, Д. П. Лаошвили, В. Ш. Метревели // Техническая электродинамика. Проблемы современной электротехники. – Киев, 2001. – С. 115–119.

3. Кохреидзе, Г. К. Энергосбережение средствами смешанной энергосистемы постоянного и переменного напряжения. Проблемы автоматизированного привода / Г. К. Кохреидзе, Д. П. Лаошвили, В. Ш. Метревели // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та. – 2001. – Вып. 10. – С. 231–322.

4. Якименко, Ю. И. Фотоэнергетические системы / Ю. И. Якименко, А. Н. Шмырева, А. В. Богдан // Техническая электродинамика. Проблемы современной электротехники. – Киев, 2000. – Ч. 1. – С. 85–92.

5. Кохреидзе, Г. К. Устойчивость режимов в гибридной энергосистеме. Проблемы автоматизированного привода / Г. К. Кохреидзе [и др.] // Вестник Харьковского гос. политехн. ун-та. – 2002. – Вып. 12, т. 1. – С. 264–266.

6. Компьютерное моделирование и управление электромагнитными переходными режимами в автономных гибридных энергосистемах на базе возобновляемых источников питания / Г. К. Кохреидзе [и др.] // Техническая электродинамика. – Киев, 2002. – С. 185–191.

7. Моделирование динамических процессов в автономной энергосистеме с возобновляемыми источниками энергии / Г. К. Кохреидзе [и др.] // Техническая электродинамика. Силовая электроника и энергоэффективность. – Киев, 2002. – С. 109–113.

8. Двухфазный импульсный преобразователь постоянного тока для рудничных аккумуляторных электровозов / О. Н. Синчук [и др.] // Техническая электродинамика. Силовая электроника и энергоэффективность. – Киев, 2002. – С. 11–13.

9. Флоренцов, С. Н. Состояние и тенденции развития силовых модулей / С. Н. Флоренцов // Техническая электродинамика. Проблемы современной электротехники. – Киев, 2000. – Ч. 1. – С. 50–57.

10. Преобразовательная установка, работающая на сеть переменного тока / В. И. Сенько [и др.] // Техническая электродинамика. Силовая электроника и энергоэффективность. – Киев, 2002. – Ч. 1. – С. 62–65.

Поступила 11.11.2009

УДК 621.83.52

## **ПРИМЕНЕНИЕ МЯГКОГО ПУСКА, ТОРМОЖЕНИЯ И РАБОТЫ НА ПОНИЖЕННОЙ СКОРОСТИ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ДЛЯ МЕХАНИЗМОВ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ КРАНОВ**

**Докт. техн. наук, проф. ФИРАГО Б. И., асп. ВАСИЛЬЕВ Д. С.**

*Белорусский национальный технический университет*

В электроприводах (ЭП) механизмов передвижения кранов и тележек до настоящего времени применяются асинхронные двигатели (АД) с короткозамкнутым ротором как наиболее простые, дешевые и надежные [1]. Недостатками их является наличие больших пусковых токов и ударных электромагнитных моментов, отрицательно влияющих на долговечность и надежность работы механических передач. В ЭП, где по технологическим причинам не требуется длительная работа на промежуточных скоростях, требования по обеспечению экономичности работы ЭП, плавности пускотормозных процессов, ограничению ударных моментов и пусковых токов, получению пониженных устойчивых скоростей для точной остановки могут быть удовлетворены с помощью устройств плавного пуска (УПП) и торможения [2]. На выходе УПП с помощью системы управления изменяется величина первой гармоники питающего АД напряжения при его постоянной частоте. При определенном алгоритме управления на выходе УПП можно получить также напряжение пониженной частоты, которое