

токов и несинусоидальности в других.

Перечень ссылок

1. Вагин Г. Я. Основные направления экономии энергии на металлургических предприятиях / Г. Я. Вагин, А. Б. Лоскутов, С. А. Шалаев – М. : Промышленная энергетика. – 1995. – № 9. – С. 12–15.
2. Энергетика України / Міністерство енергетики України. – К. : Міненерго України, 1998. – 34 с.
3. Борисов Б. П. Электроснабжение электротехнологических установок / Б. П. Борисов, Г. Я. Вагин – К. : Наук. Думка, 1985. – 248 с.
4. Гудим В. І. Електромагнітна сумісність електропостачальних систем дугових сталеплавильних печей. / В. І. Гудим // Праці III Міжнародної науково-технічної конференції «Математичне моделювання в електротехніці, електроніці та електроенер-

гетиці». – Львів, 1994. – С. 63–67.

5. Зиновкин В. В. Анализ повреждаемости трансформаторов, питающих энергоёмкие резкопеременные потребители промпредприятий / В. В. Зиновкин, А. П. Васильковский, Д. В. Зозуля, А. П. Лютый // Труды научн-техн. конф. «Трансформаторостроение». – Запорожье: ВИТ, 1995. – С. 138–145.
6. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий / И. В. Жежеленко – М. : Энергоатомиздат, 2004. – 358 с.
7. Рейгольд Р. Эксплуатационные режимы электро-энергетических систем и установок / Р. Рейгольд; пер. с нем.; под ред. К. С. Демирчяна. – Л. : Энергия, 1980. – 578 с.

Поступила в редакцию 23.03.09 г.

После доработки 13.04.09 г.

Запропонована математична модель і методика комп'ютерного моделювання нестационарних електромагнітних процесів в системі електропостачання енергоємного електротехнологічного комплексу з нелінійним навантаженням і приведені результати досліджень.

A mathematical model and method of computer design of non-stationary electromagnetic processes in the power supply system of power-intensive electrical engineering complex with the nonlinear loading are offered and the results of researches are presented.

УДК 621.355.1(088.8)

В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая

Метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрической установки

Предложен метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрических установок с применением системы промежуточных накопителей энергии, позволяющей повысить эффективность использования энергии фотопреобразователей в неблагоприятных условиях их работы.

Введение

Вследствие присущей фотоэлектрическим установкам (ФЭУ) нестабильности генерируемой энергии, вызванной совокупностью как внешних, так и внутренних факторов, возникает необходимость в резервировании энергии для энергоснабжения потребителей в периоды неблагоприятных условий работы, когда выработка электроэнергии ФЭУ снижается или полностью отсутствует.

Проблема резерва электроэнергии особенно остро проявляется при использовании работающих вне централизованной сети энергообеспечения автономных фотоэлектростанций малой и средней мощности. Традиционно в таких случаях в качестве резервного источника электроэнергии используются химические источники тока (ХИТ), входящие в состав ФЭУ. Однако в силу своих внутренних особенностей ХИТ не допускают снижения уровня накопленной в них энергии ниже критического значения, при этом восполнение

израсходованной энергии осуществляется за счет части энергии, вырабатываемой ФЭУ. Но в реальных условиях работы существует вероятность продолжительных периодов с низким уровнем освещенности, когда текущие значения напряжения и тока вырабатываемой ФЭУ энергии недостаточны для зарядки ХИТ, и тогда только энергоёмкость ХИТ определит продолжительность непрерывного энергоснабжения потребителей.

Наглядно режимы работы фотобатареи (ФБ) совместно с ХИТ можно проиллюстрировать с помощью типичной вольтамперной характеристики ФБ (см., например, [1]), приведенной в упрощенном виде на рис. 1. Устойчивое энергоснабжение потребителей, по мнению авторов цитируемой работы, обеспечивается ФБ при уровнях освещенности, соответствующих режиму работы ФБ в области 1, расположенной выше линии ОА – прямой максимальной мощности ФБ. При уровнях освещенности, соответствующих области 2, расположенной ниже прямой максимальной мощности, ФБ

© В. А. Дзензерский, С. В. Плаксин, Н. Е. Житник, Л. М. Погорелая 2009 г.

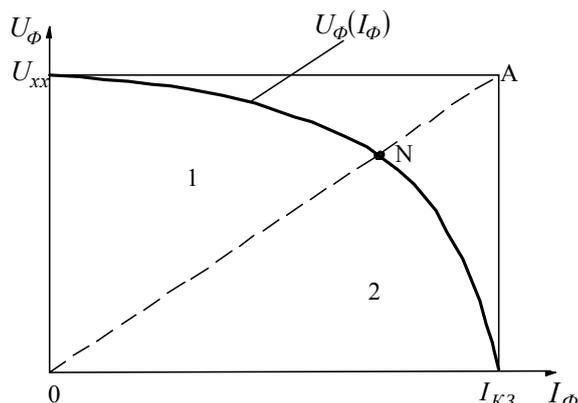


Рис. 1. Вольтамперная характеристика фотобатареи

не в состоянии обеспечить потребителей электроэнергией заданного качества, и эту функцию берет на себя ХИТ. Решить эту задачу в данной работе предлагается путем рационального использования энергии, генерируемой ФБ при низких уровнях освещенности — в области 2.

Цель данной работы — разработать такой метод зарядки химического источника тока, который позволит использовать электроэнергию с недостаточными для стандартной зарядки параметрами, вырабатываемую фотоэлектрической установкой при неблагоприятных условиях ее работы.

Метод использует принцип энергосберегающих импульсных технологий, заключающийся в порционном отборе от ФЭУ энергии любого качества и количества, накоплении ее в промежуточных пассивных накопителях и последующей передаче на заряжаемый ХИТ в виде сформированных зарядных импульсов заданных амплитуды и длительности.

Зарядка химических источников тока с использованием пассивных накопителей электроэнергии

Известные из литературы работы по применению конденсаторов и катушек индуктивности в качестве промежуточных накопителей описывают технические решения, предполагающие либо отбор энергии от всех элементов фотобатареи в общий конденсатор [2], либо от каждого элемента на отдельный конденсатор с последующей поочередной передачей ее в индуктивность [3]. И в том и другом случае для обеспечения эффективного отбора энергии от ФБ необходимо согласование внутреннего сопротивления ФБ с внутренним сопротивлением конденсатора, который является для нее нагрузкой.

Для точки максимальной мощности ФБ, определяемой из ее вольтамперной характеристики, емкость накопительного конденсатора должна удовлетворять условию [2]

$$C \geq \frac{I_{K3\max} \cdot \tau_{B\max}}{0,03U_{xx}}, \quad (1)$$

где $I_{K3\max}$ — ток короткого замыкания ФБ при максимальном уровне освещенности; $\tau_{B\max}$ — максималь-

ная длительность включенного состояния конденсатора, или время его заряда; U_{xx} — напряжение холостого хода ФБ.

В соответствии с выражением (1) конкретным значениям тока и напряжения ФБ должно соответствовать конкретное значение емкости конденсатора, и именно оно отвечает за условия согласования ФБ с конденсатором как с нагрузкой. В связи с этим в системах отбора такого типа оптимальное согласование нагрузки с фотобатареей осуществляется в сравнительно узком интервале изменения напряжений и токов ФБ, который определяется из выражения

$$C \geq \frac{I_{CB} \cdot \tau_B}{\Delta U}, \quad (2)$$

где I_{CB} — текущее значение тока ФБ при данном уровне освещенности ФБ; ΔU — максимально допустимое отклонение напряжения ФБ от точки максимальной мощности.

При рассогласовании фотобатареи и нагрузки эффективность работы ФБ резко снижается в соответствии с выражением [4]

$$\eta = \frac{R_H}{R_H + R_{BH}}, \quad (3)$$

где η — КПД ФБ, R_H и R_{BH} — сопротивления нагрузки и фотобатареи соответственно.

Таким образом, из анализа технических решений [2, 3] следует, что при их реализации диапазон освещенностей, при которых фотобатарея используется наиболее эффективно, ограничивается областью 1 на рис. 1.

В предлагаемом нами техническом решении для минимизации влияния рассогласования ФБ и нагрузки на КПД фотобатареи и более эффективного отбора энергии от фотобатареи при низких уровнях освещенности в качестве нагрузки ФБ используется блок низковольтных суперконденсаторов, коммутируемых по определенному алгоритму в зависимости от уровня освещенности фотобатареи и, следовательно, величины ее внутреннего сопротивления R_{BH} .

Как видно из блок-схемы, приведенной на рис. 2, роль промежуточных накопителей энергии, как и в вышеописанных технических решениях, выполняют индуктивность L_H и конденсаторы C_C и C_H , из которых система контроля и управления, работающая по заданному алгоритму, образует зарядно-разрядные энергетические контуры. С помощью этих контуров накопленная энергия, отобранная от ФБ, формируется в зарядно-разрядные импульсы заданных длительности и амплитуды для зарядки химического источника тока, или аккумуляторной батареи (АБ). Схема управления элементами системы коммутации, которые для простоты изображены ключами К1–К5, на блок-схеме не приведена, поскольку имеет множество вариантов схмотехнического исполнения.

Управление режимами работы блока суперконденсаторов заключается в том, что суперконденсаторы при подключении к ФБ для зарядки соединяются по

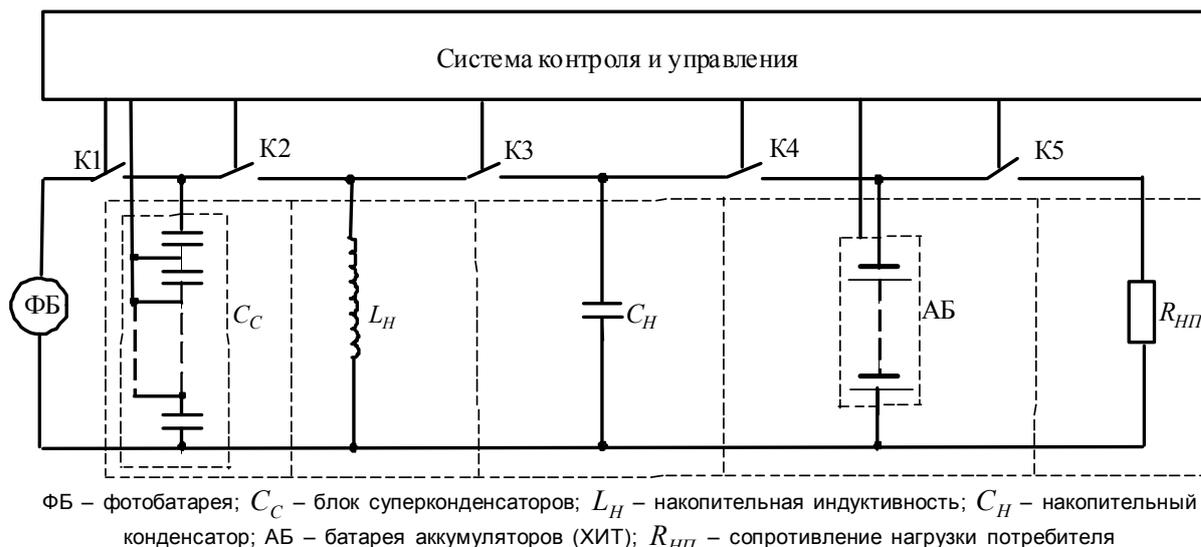


Рис. 2. Блок-схема системы отбора энергии от фотобатареи и зарядки химического источника тока

параллельной либо последовательно-параллельной схеме в зависимости от величины снимаемого с ФБ напряжения, а при подключении для разряда к нагрузке, в качестве которой используется индуктивность L_H , соединяются последовательно, благодаря чему удастся легко осуществлять как согласование ФБ и конденсаторов по сопротивлению, так и преобразование напряжения низкого уровня на входе блока C_C в напряжение высокого уровня на выходе и исключить потери энергии, которые имели бы место в случае преобразования другими методами.

Рассмотрим работу системы с кратким анализом происходящих в ней энергетических процессов.

В исходном состоянии фотобатарея, изображенная на рис. 2 как первичный источник энергии (ФБ), посредством системы контроля и управления подключена к блоку суперконденсаторов C_C . Поскольку фотобатарея эквивалентна источнику тока (что подтверждается возможностью ее работы в режиме короткого замыкания), напряжение на суперконденсаторах описывается выражением

$$U_{C_C} = \frac{1}{C} \int_0^{t_{3C}} i_{\text{ФБ}}(t) dt = \frac{I_{3C}}{C} \cdot t_{3C}, \quad (4)$$

где C – емкость суперконденсаторов, подключенных к ФБ; $i_{\text{ФБ}}$ – текущее значение тока фотобатареи; t_{3C} – время зарядки суперконденсаторов; I_{3C} – постоянный ток зарядки суперконденсаторов.

Отбор энергии от ФБ и передача ее в индуктивность L_H осуществляется до того момента, когда накопленного в индуктивности количества энергии будет достаточно для формирования с помощью накопительного конденсатора C_H зарядного импульса для ХИТ. Причем величина этого временного промежутка будет определяться энергетическими возможностями ФБ, прямо пропорционально зависящими от интенсивности солнечной освещенности, и скоростью

передачи энергии от ФБ к катушке индуктивности L_H , ограниченной частотой заряда-разряда суперконденсаторов, которая не должна превышать допустимого паспортного значения на конкретный тип конденсаторов. С этой частотой производится поочередное переключение ключей K1 и K2 и порционная передача энергии от ФБ к C_C и L_H для ее накопления.

Величина индуктивности L_H , выполняющей функции накопителя-дозатора энергии, определяется исходя из величины требуемого напряжения заряда накопительного конденсатора C_H и длительности зарядных импульсов, подаваемых на ХИТ.

При накоплении в индуктивности заданного количества энергии замыкается ключ K3 и энергия передается в накопительный конденсатор C_H . Энергия полностью заряженного конденсатора определяется известным выражением

$$W_C = \frac{1}{2} C \cdot U_{C_0}^2, \quad (5)$$

где C – емкость накопительного конденсатора; U_{C_0} – напряжение на накопительном конденсаторе, соответствующее моменту окончания его заряда.

Необходимым условием полного заряда конденсатора, достаточного для формирования зарядного импульса ХИТ, является выполнение неравенства

$$U_{C_0} > U_{\text{АБ}}, \quad (6)$$

где $U_{\text{АБ}} = U_{\text{РЦ}} + \Delta U_{\text{АБ}}$; $U_{\text{РЦ}}$ – напряжение разомкнутой цепи химического источника тока (АБ); $\Delta U_{\text{АБ}}$ – напряжение поляризации АБ.

После выполнения условия (6) ключ K3 размыкается и замыкается ключ K4 на время t_3 , в течение которого на батарею аккумуляторов передается энергия

$$W_3 = \int_0^{t_3} i_3^2 R_{\text{АБ}} dt, \quad (7)$$

где i_3 – величина тока зарядного импульса, равная емкостному току, возникшему после замыкания ключа К4; $R_{AB} = R_a + R_n$ – сопротивление АБ, состоящее из активного сопротивления R_a электролита и активных масс электродов и поляризационного сопротивления R_n .

Так как конденсатор C_H разряжается до напряжения, равного по величине U_{AB} , то баланс энергии с учетом неполного разряда конденсатора определится выражением

$$\frac{1}{2}CU_{C_0}^2 = \int_0^{t_3} i_3^2 R_{AB} dt + \frac{1}{2}CU_{C_{t_3}}^2 + W_n, \quad (8)$$

где $U_{C_{t_3}}$ – напряжение на конденсаторе C_H в момент окончания зарядного импульса, равное по величине правой части неравенства (6); W_n – энергия потерь.

Ток зарядки АБ при разряде на нее конденсатора C_H равен

$$i_3 = C \frac{dU_C}{dt} = \frac{U_{C_0}}{R_{AB}} e^{-t_3/\tau}, \quad (9)$$

где $\tau = R_{AB}C$ – постоянная времени цепи C_H – АБ, при этом процесс разряда накопительного конденсатора протекает при токе

$$i_{C_p} > i_3 = \frac{U_{C_0}}{R_{AB}} \cdot e^{-t_3/\tau}, \quad (10)$$

С учетом этого из (8) видно, что энергия, затраченная на зарядку аккумуляторной батареи за один импульс на величину

$$\frac{1}{2}C(U_{C_0}^2 - U_{C_{t_3}}^2) = \int_0^{t_3} i_3^2 R_{AB} dt + W_n, \quad (11)$$

меньше первоначальной энергии конденсатора, определяемой из (5).

Известно [5], что при разряде конденсатора на сопротивление напряжение на нем изменяется по закону

$$U_C(t) = U_{C_0} e^{-t/\tau}, \quad (12)$$

следовательно,

$$U_C(t) = U_{C_{t_3}} = U_{C_0} e^{-t_3/\tau}. \quad (13)$$

Тогда, подставив в (11) значение для $U_{C_{t_3}}$, получим выражение для энергии, непосредственно израсходованной на зарядку АБ за один импульс

$$W_3 = \frac{1}{2}CU_{C_0}^2 (1 - e^{-2t_3/\tau}). \quad (14)$$

После разряда накопительного конденсатора на батарею аккумуляторов напряжение на нем в конце

разряда принимает значение, равное $U_{C_{t_3}}$, величина которого зависит от степени заряженности АБ. По достижении этого значения напряжения ключ К4 размыкается, замыкается ключ К3 и происходит очередной цикл заряда накопительного конденсатора, но уже не от начального значения $U_C = 0$, а от значения $U_{C_{t_3}}$, при этом энергия конденсатора в момент замыкания ключа К3, то есть начальная энергия $W_0 \neq 0$, а $W_0 = \frac{1}{2}CU_{C_{t_3}}^2$ и представляет собой энергию сбережения.

Таким образом, и при разряде C_H за время t_3 на АБ, и при его заряде от индуктивности L_H происходит экономия электроэнергии, вырабатываемой ФБ и накапливаемой в катушке индуктивности, то есть достигается энергосбережение в системе электроснабжения потребителей в целом.

Длительность зарядного импульса t_3 , действующего на АБ, можно определить из выражения (9)

$$t_3 = \tau \ln \frac{U_{C_0}}{R_{AB} i_3} = R_{AB} C \ln \frac{U_{C_0}}{R_{AB} i_3},$$

или

$$t_3 = R_{AB} C \ln \frac{U_{C_0}}{U_{AB}}. \quad (15)$$

Полученные выражения устанавливают связь между длительностью зарядного импульса, величиной зарядного тока АБ, ее сопротивлением, емкостью накопительного конденсатора C_H и величиной напряжения на нем.

Аналогичным образом получим выражение для времени заряда накопительного конденсатора C_H в виде

$$t_{3C} = \tau_{3Ц} \ln \frac{E - U_{C_{t_3}}}{E - U_{C_0}}, \quad (16)$$

где $\tau_{3Ц}$ – постоянная времени зарядной цепи LC ; E – напряжение на индуктивности, приложенное к конденсатору; $U_{C_{t_3}}$ – напряжение на конденсаторе в конце зарядного импульса.

Для формирования импульса зарядки АБ необходимо выполнение неравенства

$$t_3 > t_{3C}, \quad (17)$$

что легко осуществимо, так как конденсатор C_H заряжается до напряжения U_{C_0} не от нулевого значения, а от начального напряжения $U_{C_{t_3}}$.

Таким образом, частота воздействия зарядными импульсами на батарею аккумуляторов будет определяться кинетикой электрохимического процесса зарядки. Контроль состояния АБ при ее зарядке осуществляется системой контроля и управления по значениям информационных параметров АБ, приведен-

ных в [6], а оптимизация процесса зарядки АБ производится с учетом взаимосвязи параметров батареи аккумуляторов с параметрами зарядных импульсов, описываемой выражением (15).

Для реализации метода необходимо наличие в составе ФЭУ двух химических источников тока, работающих в циклическом режиме: когда один из них разряжается на нагрузку, то есть обеспечивает потребителя электроэнергией, другой заряжается от ФЭУ и т. д. с поочередной сменой режимов их работы.

По достижении аккумуляторной батареей полной зарядки по сигналу системы контроля и управления ключ К4 размыкается, замыкается ключ К5 и заряженная аккумуляторная батарея подключается к нагрузке $R_{нп}$, а другая аккумуляторная батарея, работавшая до этого на нагрузку, подключается к системе зарядки.

При работе ФБ в режимах, соответствующих освещенностям области 1, ключи К1–К5 переводятся в замкнутое состояние и энергия от фотобатареи поступает непосредственно в нагрузку и на АБ для ее подзарядки.

Выводы

Разработан метод зарядки химических источников тока в составе фотоэлектрических установок с использованием промежуточных пассивных накопителей электроэнергии в виде низковольтных суперконденсаторов и последующей ее порционной передачей на заряжаемый ХИТ в виде сформированных зарядных импульсов заданных амплитуды и длительности. Метод позволяет использовать электроэнергию, вырабатываемую фотоэлектрической установкой при неблагоприятных условиях ее работы с недостаточными для стандартной зарядки текущими параметрами.

Запропоновано метод зарядження хімічних джерел струму у складі фотоелектричних установок з системою проміжних накопичувачів енергії, яка дозволяє підвищити ефективність використання енергії фотоперетворювачів в несприятливих умовах їх роботи.

The method of chemical current sources charging in a body of the photovoltaic power stations with the use of the intermediate energy storage system is offered; it allows improving the efficiency of photovoltaic power system use at the adverse working condition.

Перечень ссылок

1. Богдан А. В. Проектирование автономных фото-энергетических систем / А. В. Богдан, В. М. Спивак, А. Н. Шмырева, Ю. И. Якименко // Технічна електродинаміка. Тем. випуск. Силова електроніка та енергоефективність. – Ч.2. – 2007. – С. 35–38.
2. Пат. 2195754 Российская Федерация, МПК H02J7/32, H02J7/35. Устройство и способ отбора электрической энергии от солнечной батареи / Н. К. Чернилевский, П. Ф. Гнатенко; Заявитель и патенто-обладатель Чернилевский Н. К. – № 99119111/09; заявл. 01.09.99; опубл. 27.12.02. – 8 с.
3. Пат.10269 U Україна, МПК H02J7/32, H02J7/35. Спосіб відбору електричної енергії від сонячної батареї / М. В. Чашко, О. В. Левшов, К. О. Філь; Заявник і патентовласник Донецький нац.-техн. ун-т. – № 200503035; заявл. 04.04.05; опубл. 15.11.05. Бюл. № 11. – 2 с.
4. Чирва В. П. Кремниевые планарные фотоэлектрические генераторы / В. П. Чирва, М. С. Саидов / Гелиотехника. – 1993. – № 6. – С. 19–37.
5. Гинзбург С. Г. Методы решения задач по переходным процессам в электрических цепях. – М. : Высшая школа, 1967. – 388 с.
6. Житник Н. Е. Информационные параметры для реализации адаптивной зарядки вторичных химических источников тока. / Н. Е. Житник, Ю. Л. Миропольский, С. В. Плаксин, Л. М. Погорелая, И. И. Соколовский // ТКЭА. – 2008. – № 5(77). – С. 40–42.

Поступила в редакцию 11.02.09 г.

После доработки 02.04.09 г.