

POWER STORAGE AND MANAGEMENT SYSTEMS FROM MICROBIAL FUEL CELLS

Ivaylo Valev, Kiril Dzhustrov

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: Ivailo_val@abv.bg

ABSTRACT. Microbial fuel cells (MFCs) offer an environmentally sustainable approach for generating electrical energy from wastewater. A primary limitation to their practical applicability is the low output voltage and power, which makes the direct supply of electronic or other devices unfeasible. A solution to this challenge is provided by power management systems (PMS). These electronic systems optimise the output power of MFCs, store the harvested energy, and condition it for practical applications through the use of power converters and efficiency-oriented control algorithms. This work presents a review of contemporary approaches, designs, results, and challenges in the field.

Key words: microbial fuel cells (MFC), power management systems (PMS), Maximum Power Point (MPP), DC/DC converter, supercapacitor (SC), energy efficiency.

СИСТЕМИ ЗА СЪХРАНЕНИЕ И УПРАВЛЕНИЕ НА ЕНЕРГИЯ ОТ МИКРОБНИ ГОРИВНИ КЛЕТКИ

Ивайло Вълев, Кирил Джустров

Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Микробните горивни клетки (МГК) предлагат екологично чист начин за производство на електрическа енергия от отпадъчни води. Основен проблем за практическата им приложимост е ниското напрежение и мощност, което прави невъзможно директното захранване на електронни или други устройства. Решение на този проблем представляват системите за управление на мощността. Тези електронни системи оптимизират изходната мощност на МГК, акумулират енергията и я подготвят за реални приложения чрез преобразуватели и алгоритми за максимална ефективност. Тази работа представя обзор на съвременни подходи, архитектури, резултати и предизвикателства в областта.

Ключови думи: микробни горивни клетки (МГК), системи за управление на мощността, точка на максимална мощност, DC/DC преобразувател, суперкондензатор, енергийна ефективност.

Въведение

Микробните горивни клетки (Microbial Fuel Cells – MFC) представляват биоелектрохимични системи (BES), които преобразуват химичната енергия на различни субстрати в електрическа енергия, чрез метаболитната активност на микроорганизмите. Тази технология привлича значителен научен интерес позволявайки едновременно пречистване на отпадъчни води и производство на електричество (Erbay et al., 2013).

Огромен набор от микроорганизми могат да произвеждат електрически ток и да пренасят електрони към анодите на различни видове BES (Logan et al., 2019).

MFC могат да произвеждат електрическа енергия от много различни субстрати, включително от сложна органична материя в отпадъчните води (Capodaglio et al., 2013). Биоразградимият субстрат се окислява на анода и електроните се прехвърлят през външна верига към катода, където реакцията на редукция на кислорода (ORR) завършва веригата, произвеждайки електрическа енергия (Logan et al., 2019; Kumar et al., 2017).

MFC могат да бъдат направени с относително евтини материали и прости конфигурации (Wang et al., 2019; Feng and Cheng, 2016; Choi et al., 2018), но липсата на стандартизирани условия е довела до резултати, които не могат да бъдат директно сравнени поради разлики в конфигурацията на реакторите (Logan et al., 2015; Yang et al., 2017).

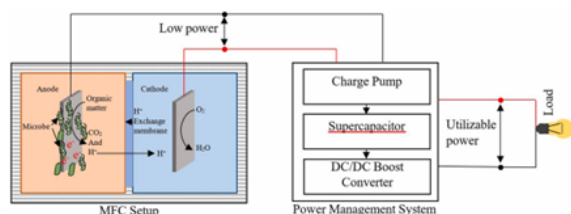
MFC са изследвани като обещаващ възобновяем източник на енергия, въпреки че производството и използването на енергия от тях не е проста задача поради малката изходна мощност и ниското изходно напрежение, което ограничава директното им приложение в практиката (Erbay et al., 2013).

BES имат потенциал за устойчиво производство на енергия, особено за автономни системи и IoT устройства, но техните електрически характеристики изискват усъвършенствани системи за управление на мощността (Power management system - PMS) с цел приложението им за практическа употреба.

Основният принцип на работа на PMS е да съхранява генерираната електрическа енергия в кондензатор (суперкондензатор), като модифицира параметрите ѝ, за да постигне необходимото ниво, преди да я подаде към товара (Alipanahi et al., 2019). Повечето от изходните напрежения на MFC са в диапазона от 300–900 mV (Tang et al., 2015; Donovan et al., 2011), докато повечето потребителски електронни устройства изискват над 3,3 V за своята работа.

Основни компоненти на системите за управление на мощността (PMS) за BES

Този преглед се фокусира главно върху системите за управление на мощността (PMS), които могат да се използват заедно с MFC за подобряване на енергийната им мощност с цел захранване на различни видове електронни уреди. PMS са съставени от няколко електронни компоненти, които работят заедно, за да преобразуват ниските електрически входни параметри в използвана изходна мощност. Основната конфигурация на PMS включва главно зарядна помпа (кондензаторен преобразовател на напрежение), суперкондензатор и усилвател. Интегрирането на тези основни системи за управление на захранването позволяват подобряване на изходните характеристики на MFC за стабилно и сигурно захранване на малки уреди. (Dutta et al., 2022).



Фиг. 1. Принципна конфигурация на PMS интегрирана в MFC включваща зарядна помпа, суперкондензатор и усилвател. (Dutta et al., 2022)

Таблица 1. Основни компоненти и функциите им в PMS

Компонент	Функция
MPPT (Maximum Power Point Tracking)	Оптимизира работа на МГК по напрежение и ток за максимално производство на енергия
Supercapacitor /суперкондензатор/	Енергийно акумулиране, съхранява генерираната енергия
DC-DC Boost converter (импулсен преобразувател)	Повишава напрежението до подходящо работно ниво за товара
Контролни алгоритми	Управлят и поддържат енергийния поток

Системата за акумулиране на енергия и контролирането на работната точка на MFC, чрез проследяване на точката на максимална мощност (MPPT) е от съществено значение за максимизирането на събраната енергия, което изисква сложна система за управление, която консумира значително количество енергия. Въпреки че тази управляваща мощност е критичен фактор поради същественото ѝ влияние върху общата ефективност, тя до голяма степен е пренебрегвана (Dutta et al., 2022).

Maximum Power Point Tracking (MPPT) за Микробни горивни клетки (MFC): теория, приложения и съвременни подходи

За реални приложения, като автономни сензорни мрежи, портативни устройства или подпомагане на инфраструктурни системи е необходимо максимално ефективно извличане и управление на енергията. Тук на помощ идва MPPT – технология за динамично управление, която оптимизира електрическото натоварване, така че MFC да работи при *точката на максимална мощност* (MPPT) (Parka and Renb, 2012).

Поради ограниченията, като ниската изходна мощност и ниското изходно напрежение от MFC се разработват различни енергийни управляващи системи (PMS), които включват алгоритми за MPPT. Целта на MPPT е да поддържа работната точка на системата в положение, при което се извлича максималната възможна електрическа мощност от горивната клетка (Alaraj et al., 2017).

Характеристики на мощността при MFC

Изходната мощност на MFC зависи от множество фактори, включително концентрацията на субстрата, активността на микроорганизмите, вътрешното съпротивление, условията на околната среда и др..

Въз основа на анализа на съпротивленията на електродите, катодът често е идентифициран като основен

фактор за вътрешното съпротивление на клетката (Dominguez-Benetton et al., 2012; Rossi et al., 2019).

За всяко конкретно състояние съществува една оптимална работна точка, при която произведената мощност е максимална – т.нар. Maximum Power Point (MPP).

Тази точка се определя от връзката между напрежението и тока на клетката. Промени в биохимичните процеси или външното натоварване могат да доведат до значителни колебания в характеристиките на системата. Поради тази динамика поддържането на оптималната работна точка е сложно и изисква адаптивни алгоритми за управление (Parka and Renb, 2012).

Принцип на Maximum Power Point Tracking

MPPT представлява алгоритъм за управление, при който чрез промяна на еквивалентното натоварване се регулира напрежението и токът на горивната клетка, така че системата да работи в точката на максимална мощност. Това обикновено се реализира чрез DC-DC преобразуватели, които адаптират импеданса на товара към вътрешния импеданс на MFC (Alaraj and Park, 2019).

Повишаване и стабилизация на напрежението чрез DC-DC преобразуватели

Поради ниското входно напрежение, PMS използват DC-DC преобразуватели за повишаване напрежението до използваемите стойности (Zhang et al., 2012).

DC-DC преобразувателите са електронни устройства, които преобразуват едно ниво на постоянно напрежение в друго. Основните типове включват:

- Boost (повишаващи) – увеличават входното напрежение;
- Buck (понижаващи) – намаляват напрежението;
- Buck-boost – комбинирана топология;
- Flyback - той действа като Buck-boost конвертор със свързан индуктор, който съхранява енергия, осигурявайки множество, електрически изолирани изходни напрежения.

При MFC най-често се използват boost преобразуватели поради ниското входно напрежение.

Zhang et al., (2015) в свои изследвания показват, че високоефективни boost преобразуватели могат да повишат напрежението от порядъка на 0.4–0.7 V до стабилни нива, подходящи за електронни устройства, с ефективност до 85%.

DC-DC преобразувателите изпълняват ключова роля при извличането на максимална мощност от MFC. Те:

- действат като адаптивен товар (еквивалентно съпротивление);
- позволяват оптимизация на работната точка;
- увеличават ефективността на енергийното извличане;

Параметри като индуктивност, коефициент на запълване (duty cycle) и честота на превключване имат съществено влияние върху добива на енергия и ефективността (Wang et al., 2017).

Alaraj et al., (2014) докладват, че чрез прилагане на съвременни решения използващи синхронни flyback преобразуватели, постигат намаляване на загубите и повишават ефективността на преобразуване с над 30% спрямо класическите схеми.

Основната идея е да се следи произведената мощност и чрез алгоритмична оптимизация да се открие

максималната стойност на тази функция. След като бъде намерена, контролерът постоянно коригира работната точка, за да компенсира измененията в системата (Alaraj and Park, J., 2019).

DC-DC преобразувателите и PMS намират приложение в:

- безжични сензорни мрежи;
- мониторинг на околната среда;
- пречистване на отпадъчни води с енергийно възстановяване;
- автономни IoT устройства.

Тези системи позволяват използването на MFC като устойчив енергиен източник в отдалечени или труднодостъпни райони.

Основните предизвикателства включват:

- много ниско входно напрежение (под 0.5 V);
- ниска ефективност при малки мощности;
- сложност на управляващите схеми.

Бъдещите изследвания са насочени към:

- ултра-нискоенергийни DC-DC преобразуватели;
- интелигентни PMS с адаптивно управление;
- интеграция с IoT системи.

Суперкондензаторите в системите за управление на мощността: приложение и значение за MFC

Основни ограничения при приложението на MFC са ниска плътност на мощността, високо вътрешно съпротивление и нестабилният изходен ток.

Тези ограничения налагат използването на допълнителни устройства за съхранение на енергията, като батерии или суперкондензатори (Poli et al, 2020).

Суперкондензаторите представляват ключов елемент в съвременните системи за съхранение и управление на енергията, благодарение на високата си плътност на мощността, дълъг експлоатационен живот и бързи процеси на зареждане/разреждане.

Суперкондензаторите играят важна роля в системите за управление на мощността чрез: акумулиране на енергия от маломощни източници, осигуряване на импулсна мощност и стабилизиране на напрежението.

В PMS, суперкондензаторите често се използват като буфер между източника на енергия и консуматора. Те позволяват съхранената енергия да бъде освобождавана при необходимост, като по този начин повишават ефективността на системата. Изследванията показват, че предварително заредени суперкондензатори могат значително да увеличат входната мощност към PMS и да подобрят работата на системата (Li et al, 2022).

Електродите в MFC се използват като суперкондензаторни електроди, постигащи висока максимална мощност (Santoro et al., 2016).

Интеграция на суперкондензаторите в MFC

Външна интеграция – при този подход суперкондензаторът се свързва външно към MFC и служи като енергиен буфер. Това позволява акумулиране на произведената енергия и отдаване на по-висока мощност при нужда.

Изследванията показват, че външната интеграция е гъвкава и мащабируема технология за подобряване на мощностните характеристики на MFC (Poli et al., 2017).

Вътрешна интеграция (суперкондензаторни MFC) – тук електродите на MFC изпълняват едновременно функция на суперкондензатор. Тези системи се наричат суперкондензаторни микробни горивни клетки (SC-MFC).

Основните предимства на SC-MFC са: комбинирано съхранение и генериране на енергия, намаляване на вътрешното съпротивление и повишената мощност.

SC-MFC могат да генерират импулсна мощност с порядък по-висок от тази при стандартна работа (Soavi and Santoro, 2020).

Интеграцията на суперкондензатори влияе върху енергийните характеристики на MFC и водят до: увеличаване на пикова мощност; подобрена ефективност на енергийното извличане, а също така и до по-добра съвместимост с електронни устройства.

Например, увеличаването на катодната площ в SC-MFC води до значително повишаване на мощността и намаляване на вътрешното съпротивление (Jeremiah et al., 2016).

Според Santoro et al., (2016), добавянето на суперкондензаторни електроди позволява бързо самозареждане в рамките на секунди.

Хибридните системи, като SC-MFC намират приложение в автономни сензорни системи, пречиствателни станции за отпадъчни води, нискомощни електронни устройства и IoT системи.

Особено перспективни са приложенията в отдалечени райони, където се изисква устойчиво и самоподдържащо се енергийно решение.

Предизвикателства и бъдещи перспективи

Въпреки значителния напредък, съществуват редица предизвикателства като:

- ограничена енергийна плътност;
- деградация на електродите;
- необходимост от оптимизация на материалите.

Бъдещите изследвания са насочени към:

- разработване на нови електродни материали (графитен, проводими полимери и др.);
- оптимизация на архитектурата на системите;
- мащабиране на технологиите.

Видове контролни алгоритми, функции и приложението им в MFC

Ефективността на работа на MFC изисква прецизен контрол върху редица параметри като pH, температура, концентрация на субстрата, електрохимични характеристики и много други фактори.

Изборът на подходящи видове контролни алгоритми и техните функции, както и приложението им в системи с MFC е от изключителна важност за работата им.

Един от основните проблеми при MFC е тяхната нестабилност и зависимост от множество външни фактори. Поради това внедряването на ефективни контролни алгоритми е от съществено значение за оптимизиране на производителността и устойчивостта на системата (Lovley, D., 2006).

Функции на контролните алгоритми в MFC

Контролните алгоритми изпълняват няколко ключови функции:

- *Стабилизация на процеса* – поддържане на постоянни условия за оптимална микробна активност;

- *Оптимизация на ефективността* – максимизиране на електрическата мощност и ефективността на преобразуване;
- *Управление на смущения* – компенсиране на външни влияния, като температурни промени или вариации в субстрата;
- *Автоматизация* – намаляване на необходимостта от човешка намеса.

Основни видове контролни алгоритми

Пропорционално-интегрално-диференциален (PID) контрол - е един от най-широко използваните методи в индустриалната автоматизация. Той комбинира три компонента:

- Пропорционален (P)
- Интегрален (I)
- Диференциален (D)

Функцията му може да се изрази чрез:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Където $e(t)$ е грешката между желаната и действителната стойност (Åström and Murray, 2010).

В MFC PID контролерите се използват за регулиране на рН, температура и дебит на субстрата. Те осигуряват бърза реакция и стабилност, но могат да имат ограничения при силно нелинейни системи каквито са MFC.

Адаптивен контрол - адаптивните алгоритми се настройват автоматично спрямо променящите се условия в системата. Те са особено полезни при биологични процеси, където параметрите се изменят динамично. Основните им характеристики са: самонастройване, устойчивост към смущения, а също така са подходящи за нелинейни системи. Приложението им в МГК е с цел управление на микробната активност и електрохимичната ефективност при променливи натоварвания (Ioannou and Baldi, 2010).

Размити (Fuzzy) контролни алгоритми - тези алгоритми позволяват управление при несигурност и непълна информация. Вместо точни математически модели се използват правила от типа „ако-тогава“. Предимствата на тези контролни алгоритми е, че те са подходящи за сложни и нелинейни системи и не изискват точен математически модел. Приложението на този вид алгоритми при МГК се използва за регулиране на биологичните процеси, където традиционните модели са трудни за формулиране (Lotfi, 1996).

Моделно-предиктивен контрол (MPC) - използва математически модел на системата, за да предскаже бъдещото ѝ поведение и да оптимизира управляващите сигнали. Основни предимства са: оптимизация в реално време, управление на многопараметрични системи, ограничения върху входовете и изходите.

Приложението на MPC в MFC е оптимизиране на производството на електрическа енергия чрез контрол на натоварването и концентрацията на субстрата (Camacho and Bordons, 2007).

Невронни мрежи и интелигентни алгоритми

Изкуствените невронни мрежи (ANN) се използват за моделиране и управление на сложни нелинейни процеси. Предимствата на тези мрежи е възможността за обучение от данни и висока точност при сложни системи. Приложението на ANN в MFC е, че те могат да предсказват

производителността и да оптимизират параметрите на работа (Haykin, 2009).

Предизвикателства при приложението на контролни алгоритми

Въпреки напредъка, съществуват редица предизвикателства, като нелинейност на биологичните процеси, липса на точни модели, забавяне във времето (time delay), шум в измерванията и др., които изискват комбиниране на различни контролни стратегии.

Бъдещи тенденции са в развитието на различни подходи, като хибридни контролни системи, интелигентни алгоритми с машинно обучение и IoT интеграция за дистанционно управление, които ще подобрят ефективността и мащабируемостта на MFC.

MPPT алгоритми за MFC

В литературата са предложени различни алгоритми за MPPT при MFC системи. Някои от най-често използваните са:

- *Hysteresis-based MPPT* - този метод използва хистерезисен контролер, който регулира съпротивлението на товара чрез цифрово управлявани потенциометри. Системата динамично следи максималната мощност и поддържа работната точка близо до нея в реално време (Park and Ren 2012).
- *Incremental Conductance метод* - този подход използва производната на мощността спрямо напрежението, за да определи посоката на търсене на MPP. При съвременните системи се използват променливи стъпки, които подобряват точността и ефективността на алгоритъма (Fernandez and Younas, 2024).
- *Extremum Seeking Control* - този алгоритъм използва оптимизационни техники за откриване на максимума на функцията на мощността и позволява непрекъснато адаптиране към промените в биохимичните условия на MFC (Alaraj et al, 2017).

Енергийно управление и ефективност

При MFC системите особено важно е консумираната мощност от самата MPPT система да бъде минимална, тъй като произведената електрическа енергия е много малка (обикновено в диапазона на mW).

Разработени са интегрирани схеми за управление, които могат динамично да следят MPP и да оптимизират извличането на енергия независимо от колебанията в изходното напрежение на клетката. Такива системи могат значително да подобрят ефективността на енергийното извличане и да позволят захранването на нискомощни електронни устройства, например безжични сензори (Erbay et al., 2014).

Wang et al., (2012) представят експериментални изследвания на активни системи за извличане на енергия, които могат да увеличат значително добитата енергия в сравнение с пасивните методи, като същевременно подобряват кулоновата ефективност на процеса

Предизвикателства и бъдещи изследвания

Основните предизвикателства при MPPT за MFC включват:

- нисък изходен ток и напрежение на MFC, което ограничава самостоятелната работа и ускорява загубите в управлението;

- нестабилност на биологичната система, водеща до чести промени във вътрешното съпротивление и точките MPP;
- сложност при управлението и потребление на мощност, което само по себе си трябва да бъде значително по-малко от енергията, която MFC може да достави.

Бъдещите изследвания включват разработка на алгоритми с ниска консумация, по-добри модели на динамиката на MFC за MPPT и интеграция с интелигентни енергийни системи за автономни IoT приложения.

В Таблица 2 са представени примери на постигнати резултати от световната литература.

Таблица 2. Приложни системи и ефективност на PMS

Изследване	Метод	Резултат
Fernandez Feito et al. (2024)	MPPT управление на до 5 МГК	Над 87% ефективност при преобразуване на енергията
Nguyen et al. (2019)	Switched-capacitor PMS	До 85% ефективност и предотвратяване на обратни напрежения
Erbay et al. (2014)	Монолитен PMS с MPPT	Успешно захранване на безжичен сензор

Основни видове архитектура

Архитектура с директно буфериране чрез суперкондензатор

Изследвани са различни варианти на PMS за MFC за периодично захранване на електронни товари (устройства). На Фиг. 2(a) е представена базова архитектура на PMS, представляваща директно свързване на суперкондензатор, който играе ролята на буфер за енергия, за да се увеличи и контролира електрическият потенциал, генериран от MFC (Shantaram, 2005; Donovan, 2008), след това натрупаната енергия се подава към DC/DC повишаващ преобразувател (boost converter), който осигурява стабилизирано напрежение към товара. В този случай постижимото напрежение на суперкондензатора за съжаление е ограничено от изходното напрежение на MFC, което обикновено е много ниско (обикновено по-ниско от 0,8 V), което означава, че само ограничена енергия може да се съхранява и използва на цикъл на зареждане/разреждане.

Основните предимства на този подход включват:

- простота на реализацията;
- ниска цена;
- висока надеждност.

Въпреки това, директното свързване към суперкондензатора може да доведе до неефективно извличане на енергия поради липса на оптимално съгласуване на импеданса между MFC и товара (Degenne, et al., 2012). Освен това, при ниски входни напрежения стартирането на DC/DC преобразувателя може да бъде затруднено (Doms, et al., 2009).

Архитектура с charge pump и управлявано зареждане

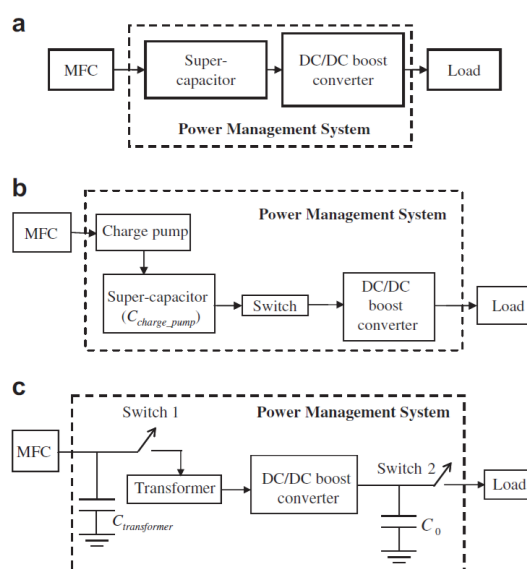
За да се преодолее този недостатък на ограниченото съхранение на енергия, е предложена усъвършенствана

архитектура, която включва зарядна помпа (charge pump) за повишаване на входното напрежение за суперкондензатора (Meehan et al., 2012), както е показано на Фиг. 2(b) - без директна връзка между MFC и суперкондензатора. След натрупване на достатъчно енергия, чрез ключ (switch) тя се подава към DC/DC преобразувателя.

Тази конфигурация предлага няколко съществени предимства:

- възможност за стартиране при много ниски входни напрежения;
- по-добро извличане на енергия от MFC;
- намаляване на загубите при преходни режими.

Недостатък е по-високата сложност и увеличените загуби в charge pump веригата (Ramadass and Chandrakasan, 2011). Освен това, управлението на ключа изисква допълнителна логика или енергийно автономен контролер.



Фиг. 2. Схеми на различни PMS за MFC: (a) тип кондензатор-преобразувател, (b) тип зарядно-помпен кондензатор-преобразувател и (c) тип кондензатор-трансформатор-преобразувател. (Zhang et al., 2012)

Архитектура с трансформатор и двустепенно превключване

Схемата на Фиг.2(c), въвежда използването на трансформатор за първоначално повишаване на напрежението, комбиниран с два ключа (Switch 1 и Switch 2) и буферен кондензатор C_0 .

Такъв тип PMS работи с нисковолтови изходи от MFC; трябва обаче да се посочи, че работи добре само ако изходното напрежение на MFC е достатъчно високо, за да задейства зарядна помпа, а цикълът на зареждане/разреждане на системата може да е дълъг, тъй като скоростта на зареждане е ограничена от зарядната помпа. За да се намали допълнително входното напрежение на PMS, без да се жертва скоростта на зареждане, е въведен трансформатор в PMS, дизайнът на която включва: кондензатор – трансформатор – преобразувател (Yang et al., 2012), както е показано на Фиг. 2(c), с един суперкондензатор за задвижване на DC/DC преобразувател, а другият (C_0) за задвижване на товара на импулси с високо напрежение и мощност. Тази PMS работи

добре, въпреки че изходното напрежение на MFC е едва 0,18 V (Zhang et al., 2012)

Работният принцип включва:

- натрупване на енергия в магнитното поле на трансформатора;
- прехвърляне на енергията към DC/DC преобразувателя;
- допълнително буфериране в изходния кондензатор.

Предимствата на този подход са:

- по-висока ефективност при ниски входни напрежения;
- по-добро управление на енергийния поток;
- възможност за импедансно съгласуване.

Недостатъците включват по-сложен дизайн, необходимост от прецизно управление на ключовете и потенциални загуби в магнитните компоненти (Szarka, et al., 2012; Wang, et al., 2015).

Сравнителен анализ на разгледаните схеми

Изборът на архитектура зависи от конкретното приложение, наличната мощност на MFC и изискванията към товара.

Таблица 3. Сравнение на основни критерий на разгледаните схеми

Критерий	Фиг. 2а	Фиг. 2б	Фиг. 2с
Сложност	ниска	средна	висока
Ефективност	средна	висока	много висока
Стартиране при ниско напрежение	ограничено	добро	отлично
Цена	ниска	средна	висока

Системите за управление на енергията са критичен компонент при използването на MFC в реални приложения. Докато базовите решения (Фиг. 2а) са подходящи за прости системи, по-сложните архитектури (Фиг. 2б и 2с) предлагат значително по-добра ефективност и надеждност при ниски входни напрежения. Бъдещите изследвания следва да се фокусират върху интеграцията на интелигентни алгоритми за управление и минимизиране на загубите.

Заклучение

PMS представляват ключов елемент за практическата употреба на MFC, като източник на електрическа енергия. Комбинацията от MPPT, енергийно акумулиране и преобразуватели повишава мощността и стабилността на системата, като дава възможност за реални приложения в автономни устройства. Продължаващите изследвания целят още по-ефективни алгоритми и интеграции с IoT платформи.

Maximum Power Point Tracking играе ключова роля за подобряване на енергийната ефективност на MFC. Поради ниското напрежение и силно променливите работни условия на MFC системите, MPPT алгоритмите позволяват оптимално извличане на електрическа енергия, чрез адаптиране на импеданса на товара и динамично управление на работната точка.

Развитието на енергийно ефективни MPPT алгоритми и интегрирани системи за управление е от съществено значение за бъдещото приложение на MFC в автономни енергийни системи и интелигентни сензорни мрежи.

Контролните алгоритми играят ключова роля за ефективната работа на MFC. Различните методи — от класически PID до интелигентни алгоритми — предлагат разнообразни решения в зависимост от сложността на системата. Комбинирането на различни подходи представляват най-перспективната посока за бъдещо развитие.

Суперкондензаторите предлагат ефективно решение за подобряване на мощностните характеристики на MFC. Интеграцията им в системите за управление на мощността позволява преодоляване на основните ограничения на MFC и разширява възможностите за практическото приложение. Хибридните системи SC-MFC са обещаваща посока за устойчиво енергийно бъдеще.

DC-DC преобразувателите са ключов елемент в реализацията на ефективни PMS за MFC. Те позволяват преодоляване на ограниченията, свързани с ниското напрежение и мощност, като по този начин разширяват приложимостта на MFC технологиите в реални инженерни системи.

Благодарности

Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0008-C01 Смарт PHD Lab 5.0 „Проектни докторанти за интелигентен растеж в областта на телекомуникациите, изкуствения интелект, автоматизацията и мехатрониката“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз

Литература

- Alaraj, M., Park, J., (2019). Net power positive maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cell, , *Journal of Power Sources* Volume 418, Pages 225-232, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.02.042>
- Alaraj, M., Radenkovic, M., Park, J., (2017). Intelligent energy harvesting scheme for microbial fuel cells: Maximum power point tracking and voltage overshoot avoidance, *Journal of Power Sources* 342, 726-732, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2016.12.104>
- Alaraj, M., Ren, Z. J., & Park, J. D., (2014). Microbial fuel cell energy harvesting using synchronous flyback converter, *Journal of Power Sources*, 247, 636-642, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.09.017>
- Alipanahi, R., Rahimnejad, M., Najafpour, G., (2019). Improvement of sediment microbial fuel cell performances by design and application of power management systems *Int. J. Hydrogen Energy*, 44, pp. 16965-16975, 10.1016/j.ijhydene.2019.04.162
- Åström, K. J., & Murray, R. M., (2010). *Feedback Systems*, Princeton University Press.
- Camacho, E. F., & Bordons, C., (2007). *Model Predictive Control*. Springer
- Capodaglio, A., Molognoni, D., Dallago, E., Liberale, A., Cella, R., Longoni, P., Pantaleoni, L., (2013). Microbial fuel cells for direct electrical energy recovery from urban wastewaters, *Sci. World J.*, <https://doi.org/10.1155/2013/634738>.

- Choi, S., Kim, B., Chang, I.S., (2018). Tracking of Shewanella one idensis MR-1 biofilm formation of a microbial electrochemical system via differential pulse voltammetry, *Bioresour. Technol.* 254, 357-361, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.047>. DOI: 10.1201/b10384-41
- Degrenne, N., Buret, F., Allard, B., Bevilacqua, P., (2012). Electrical energy generation from microbial fuel cells, *Journal of Power Sources*, Volume 205, Pages 188-193. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.082>Get rights and content
- Dominguez-Benetton, X., Sevda, S., Vanbroekhoven, K., Pant, D., (2012). The accurate use of impedance analysis for the study of microbial electrochemical systems, *Chem. Soc. Rev.* 41, 7228-7246, <https://doi.org/10.1039/c2cs35026b>.
- Doms, I., Buret, F., Morel, F., Adami, S-E., Labrousse, D., Allard, B., Zaoui, A., (2009). Self-starting boost converters for low-voltage energy harvesting." *IEEE Transactions on Power Electronics*, DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063865
- Donovan, C., Dewan, A., Heo, D., Beyenal, H., (2008). Batteryless, wireless sensor powered by a sediment microbial fuel cell *Environ. Sci. Technol.* 42, 8591-8596.
- Donovan, C., Dewan, A., Peng, H., Heo, D., Beyenal, H., (2011). Power management system for a 2.5 W remote sensor powered by a sediment microbial fuel cell, *J. Power Sources*, 196, pp., 1171-1177, 10.1016/j.jpowsour.2010.08.099
- Dutta, A., Jacob, C., Das, P., Corton, E., Stom, D., Barbora, L., Goswami, P., (2022). A review on power management systems: An electronic tool to enable microbial fuel cells for powering range of electronic appliances, *Journal of Power Sources* Volume 517, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.230688>
- Erbay, C., Carreon-Bautista, S., Sanchez-Sinencio, E., Han, A., (2014). High Performance Monolithic Power Management System with Dynamic Maximum Power Point Tracking for Microbial Fuel Cells, *Environmental Science & Technology* Vol 48/Issue 23, DOI: <https://doi.org/10.1021/es501426j>
- Feito, F., Younas T., Dinsdale R., (2024). Evaluation of a comprehensive power management system with maximum power point tracking algorithm for multiple microbial fuel cell energy harvesting, *Bioelectrochemistry*, DOI: 10.1016/j.bioelechem.2023.108597
- Feng, H., Liang, Y., Guo, K., Chen, W., Shen, D., Huang, L., Zhou, Y., Wang, M., Long, Y., (2016). TiO₂ nanotube arrays modified titanium: a stable, scalable, and costeffective bioanode for microbial fuel cells, *Environ. Sci. Technol. Lett.* 3, 420-424, <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.6b00410>.
- Fernandez, R., Younas, T., (2024). Evaluation of a comprehensive power management system with maximum power point tracking algorithm for multiple microbial fuel cell energy harvesting, *Bioelectrochemistry* Volume 155, 108597, <https://doi.org/10.1016/j.bioelechem.2023.108597>
- Haykin, S., (2009), *Neural Networks and Learning Machines*. University, Hamilton, <http://dai.fmph.uniba.sk/courses/NN/haykin.neural-networks.3ed.2009.pdf>, <https://doi.org/10.1016/j.coelec.2020.03.009>
- Ioannou, P., Baldi, S., (2010). Robust Adaptive Control, DOI: 10.1201/b10384-41
- Jeremiah, H., Santoro, C., Francesca Soavi, Serov, A., Ieropoulos, I., Arbizzani, C., Atanassov, P., (2016). Supercapacitive microbial fuel cell: Characterization and analysis for improved charge storage/delivery performance, *Bioresource Technology* Volume 218, Pages 552-560, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.06.105>
- Kumar, A., Hsu, L., Kavanagh, P., Barriere, F., Lens, P., Lapinsonniere, L., Lienhard, J., Schroder, U., Jiang, X., Leech, D., (2017). The ins and outs of microorganism-electrode electron transfer reactions, *Nat. Rev. Chem.* 1
- Li, S., Zhao, Z., Li, B., Wei T., Jiang, H., Yan, Z., (2022). Supercapacitors accumulating energy harvesting from stacked sediment microbial fuel cells and boosting input power for power management systems, *International Journal of Hydrogen Energy* Volume 47, Issue 19, Pages 10689-10700, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.11.081>
- Logan, B., Hamelers, B., Rozendal, R., Schröder, U., Keller, J., Freguia, S., Aelterman, P., Verstraete, W., Rabaey, K., (2006). Microbial fuel cells: methodology and technology, *Environ. Sci. Technol.* 40, 5181-5192, <https://doi.org/10.1021/es0605016>.
- Logan, B., Rossi, R., Ragab, A., Saikaly, P., (2019). Electroactive microorganisms in bioelectrochemical systems, *Nat. Rev. Microbiol.* 17, 307-319, <https://doi.org/10.1038/s41579-019-0173-x>.
- Logan, B., Wallack, M., Kim, K., He, W., Feng, Y., Saikaly, P., (2015). Assessment of microbial fuel cell configurations and power densities, *Environ. Sci. Technol. Lett.* 2, 206-214, <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.5b00180>.
- Lotfi A. Zadeh, (1996). *Ieee transactions on fuzzy systems*, Vol. 4, No. 2, 103 Fuzzy Logic = Computing with Words, Life Fellow, IEEE
- Lovley, D., (2006). Microbial fuel cells: novel microbial physiologies and engineering approaches, 17(3):327-32. Doi: 10.1016/j.copbio.2006.04.006.
- Meehan, A., Gao, H.W., Lewandowski, Z., (2011). Energy Harvesting with Microbial Fuel Cell and Power Management System, *IEEE Trans. Power Electron.* 6 (1), 176-181.
- Nguyen, C., Tartakovsky, B., Woodward, L., (2019). Harvesting energy from Multiple Microbial Fuel Cells with a high-conversion efficiency PMS for MFCs. *ACS Omega*, 4, 18978–18986, DOI: 10.1021/acsomega.9b01854
- Park, J., Renb, Z., (2012). Hysteresis controller based maximum power point tracking energy harvesting system for microbial fuel cells, *Journal of Power Sources* 205, 151–156, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.01.053>
- Poli, F., Santoro, C., Soavi, F., (2023). Improving microbial fuel cells power output using internal and external optimized, tailored and totally green supercapacitor, *Journal of Power Sources* Volume 564, 232780, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232780>
- Poli, F., Seri, J., Santoro, C., & Soavi, F., (2020). Boosting Microbial Fuel Cell Performance by Combining with an External Supercapacitor: An Electrochemical Study, *Chem Electro Chem*, 7, 893-903, <https://doi.org/10.1002/celc.202000083>
- Ramadas, Y., Chandrakasan, A., (2011). Voltage scalable switched capacitor energy harvesting system." *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, DOI: 10.1109/PESC.2007.4342378
- Rossi, R., Cario, B.P., Santoro, C., Yang, W., Saikaly, P.E., Logan, B.E., (2019). Evaluation of electrode and solution area-based resistances enables quantitative comparisons of factors impacting microbial fuel cell performance, *Environ. Sci. Technol.* 53, 3977-3986, <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b06004>.

- Santoro, C., Soavi, F., Serov, A., Arbizzani, C., Atanasov P., (2016). Self-powered supercapacitive microbial fuel cell: The ultimate way of boosting and harvesting power, *Biosensors and Bioelectronics* Volume 78, Pages 229-235, <https://doi.org/10.1016/j.bios.2015.11.026>
- Shantaram, A., Beyenal, H., Raajan, R., Veluchamy, A., Lewandowski, Z., (2005). Wireless Sensors Powered by Microbial Fuel Cells, *Environ. Sci. Technol.* 395037-5042.
- Soavi, F., and Santoro, C., (2020). Supercapacitive operational mode in microbial fuel cell, *Current Opinion in Electrochemistry* Volume 22, Pages 1-8.
- Szarka, G., Stark B., Burrow S., (2012). Transformer-based energy harvesting circuits. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- Tang, N., Hong W., Ewing T., Beyenal H., Kim, J., Heo D., (2015). A self-sustainable power management system for reliable power scaling up of sediment microbial fuel cells *IEEE Trans. Power Electron.*, 30(9) pp. 4626-4632, 10.1109/TPEL.2015.2397931
- Wang, H., Park, J., Ren, Z., (2012). Active Energy Harvesting from Microbial Fuel Cells at the Maximum Power Point without Using Resistors, *Environmental Science & Technology* Vol 46/Issue 9
- Wang, H., Ren, Z., & Park, J. D., (2012). Power electronic converters for microbial fuel cell energy extraction: Effects of inductance, duty ratio, and switching frequency, *Journal of Power Sources*, 220, 89-94, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.092>
- Wang, X.I.N., Cheng, S., (2009). Use of carbon mesh anodes and the effect of different pretreatment methods on power production in microbial fuel cells, *Environ. Res.* 43, 6870-6874.
- Yang, F., Zhang D., Shimotori, T., Wang, K.-C., Huang, Y., (2012). Study of transformer-based power management system and its performance optimization for microbial fuel cells, *Power Sources* 205, 86-92.
- Yang, W., Kim, K.Y., Saikaly, P.E., Logan, B.E., (2017). The impact of new cathode materials relative to baseline performance of microbial fuel cells all with the same architecture and solution chemistry, *Energy Environ. Sci.* 10, 1025-1033, <https://doi.org/10.1039/c7ee00910k>.
- Zhang, D., Yang, F., Shimotori, T., Wang, K., Huang, Y., (2012). Performance evaluation of power management systems in microbial fuel cell-based energy harvesting applications for driving small electronic devices, *Journal of Power Sources* Volume 217, Pages 65-71, <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.06.013>
- Zhang, Xu., Ren, H., Pyo S., Lee J., Kim J., Chae J., (2015). A high-efficiency DC-DC boost converter for a miniaturized microbial fuel cell, 10.1109/TPEL.2014.2323075