

## 孤島與並網模式下交直流混合微電網電能管理及控制策略 The Power Management and Control Strategies of AC-DC Hybrid Microgrids in Islanded and Grid-connected Modes

張霖<sup>1</sup>                      蔡文昌<sup>2\*</sup>  
Lin Zhang                      Wen-Chang Tsai

### 摘要

智能微電網逐漸在配電系統中佔據主導地位，該系統是一個可再生能源滲透率很高的再生能源及儲能系統。而具有交流和直流電能/負載的混合交直流系統，被認為是最可能的未來的配電系統結構。對於此種混合型交直流微電網，其控制模型及電力管理策略是最關鍵的操作技術。本文展示混合型交直流微電網系統之控制模型及電能管理策略，其中包括不同的操作模式、穩態暫態條件下的各種控制模型，以及電能管理策略的案例的研究。最後，提出了進一步研究電能管理策略的討論和建議。

**關鍵詞：**控制模型、能源管理策略、交直流混合微電網、配電系統

### Abstract

The microgrids have gradually dominated distribution systems with high penetration of renewable energy and energy storage systems. Hybrid AC-DC systems with AC and DC power/load are considered the most likely future distribution configurations. For the hybrid AC-DC microgrid, control modeling and power management strategy is one of the most critical operational aspects. This paper presents the power management strategies of hybrid AC-DC microgrid systems including different system schemes, different operating modes, control schemes under steady-state transient conditions. Also, examples of power management and control strategies are presented. Finally, suggestions and discussions for control modeling and power management strategies are reported in the paper.

**Keywords:** Power Management Strategies, Hybrid AC/DC Microgrid, Distribution System, Power Control Schemes

### 1. 簡介

微電網正在被開發為下一代發電系統，特別是在配電層級上，正在越來越多地使用分布式發電。分布式發電可以將技術分為可再生能源發電如光伏、風能、微型水力發電、沼氣、生物質能、地熱能、潮汐和海浪能，清潔替代能源產生技術如燃料和氫電池，以及傳統的基於旋轉機器的技術如柴油發電機。由於這些來源的多種好處如清潔和技術簡單，以及不斷增長的電能需求和化石燃料的有限性，可再生能源和基於清

<sup>1</sup> 廈門大學嘉庚學院機電工程學院電氣及其自動化專業

<sup>2</sup> 廈門大學嘉庚學院機電工程學院教授 douglas@xujc.com\*通訊作者

\* 本研究感谢厦门大学嘉庚学院 2020-2021 学年“省级”大学生创新创业训练计划项目：基于新工科教育之智能电网教材之先期探索与实践（编号:202013469021）经费的支持

潔替代能源的分布式發電機在微電網中起著重要作用。

微電網可以在並網或孤島運行模式下工作。特別地，儘管孤島運行時段可能非常有限，但是可以提高對智能電網的可靠性。由於可再生能源的間歇性，其他能源（例如柴油）和電池能源存儲系統（BESS）是實現微電網孤島運行或在並網運行期間平滑微電網功率的關鍵部分。存儲元素可以分為兩類：以容量為導向的能量存儲和以存取為導向的能量存儲（劉暢等，2020；丁曉通，2020；楊立濱等，2020）。以容量為導向的能量存儲沒有快速的響應時間，它們用於長期能量平衡，以緩衝分布式發電輸出功率的低頻功率振盪，並補償微電網中再生能源發電的間歇性；電池、抽水電系統、氫氣儲能是以容量為導向的儲能類型。以存取為導向的存儲設備具有快速的響應時間，並且通過提供高頻功率分量，它們負責微電網中的短時擾動，可以提供或吸收具有高功率密度的瞬變功率（王萌萌，2016）。

由於微電網中存在的直流電能如光伏發電、燃料電池等，電池能源存儲系統以及現代的直流負載，因此對混合型交流/直流微電網的研究興趣正在迅速增長。這些交流/直流微電網包含交流/直流負載和電能，具有交流和直流電能系統的優勢，被認為是未來最有可能的配電和輸電系統（張璐等，2020；賈利虎，2017；邱進亮，2019）。這種交流/直流混合微電網運行的一個關鍵方面，是控制模型和電能管理策略，這對於在並網運行模式和孤島運行模式下，提供良好的運行狀況至關重要。在微電網中，電能管理策略的目標，是朝著某些所需參數如電壓、電流、功率和頻率改變瞬時運行條件。電能管理策略包括電壓和頻率調節，以及微電網中不同功率之間的實時功率分配（詹國敏等，2019）。

由於電能管理與微電網中，功率轉換器的接口和控制更加相關，因此，本文將重點研究控制模型和電能管理問題。近年來，儘管對傳統交流微電網、直流微電網、或交流/直流微電網混合系統的運行和電能管理進行探討，本論文進一步討論混合交流/直流微電網的控制模型和電能管理策略。首先，討論不同的交流/直流微電網混合結構，包括實際的案例；其次，討論不同運行狀況下，不同類型的交/直流微電網的控制模型和電能管理策略；最後，提出對其未來的控制模型和電能管理研究的建議。

## 2. 混合型交直流微電網結構

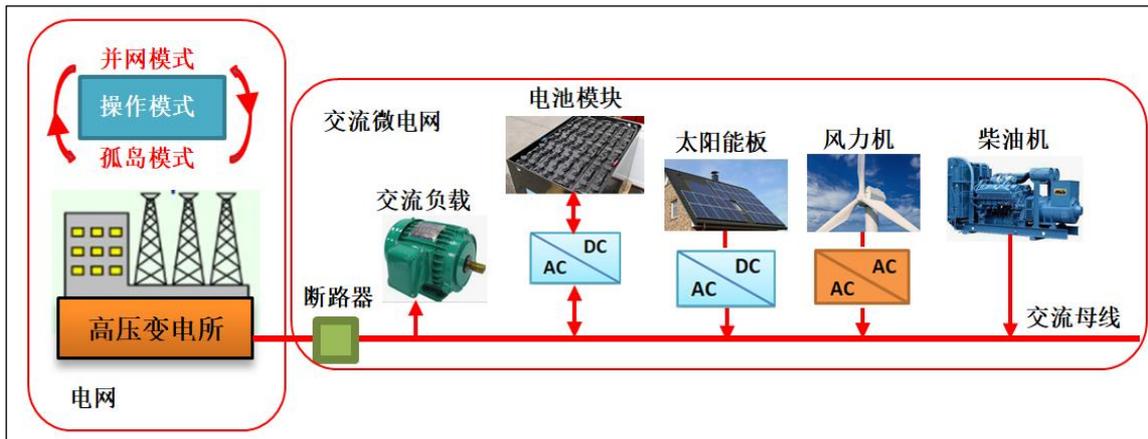
在本文中，混合型交直流微電網是指同時包含交直流電能和交直流負載的微電網。根據電能和負載與系統的連接方式以及交流和直流母線的配置方式，交流/直流混合微電網的結構可以分為交流耦合、直流耦合和交流-直流耦合微電網。在交流耦合混合微電網中，各種分布式發電和電池能源存儲系統，通過它們的接口轉換器連接到公共交流母線。在交流-直流耦合的混合微電網中，分布式發電和電池能源存儲系統連接到直流和交流母線，這些母線通過互連轉換器進行鏈接。在本文中，提供了這些微電網結構及其實際案例。

### 2.1 交流耦合的混合微電網

在圖 1a 所示的交流耦合混合微電網中，各種分布式發電和電池能源存儲系統，通過其接口轉換器連接到公共交流母線。電池能源存儲系統需要雙向轉換器以提供雙向功率流能力。在這種結構中，交流和直流負載也連接到帶或不帶電力電子轉換器之公共母線。當微電網中的主要發電源直接如從柴油發電機產生，或通過接口電力電子變換器間接產生電網的交流電壓水平時，通常使用此結構。

在這種交流耦合系統中，尤其是在孤島運行模式下，控制策略和電源管理方案主

要集中在發電/耗電平衡和交流母線電壓/頻率控制上。

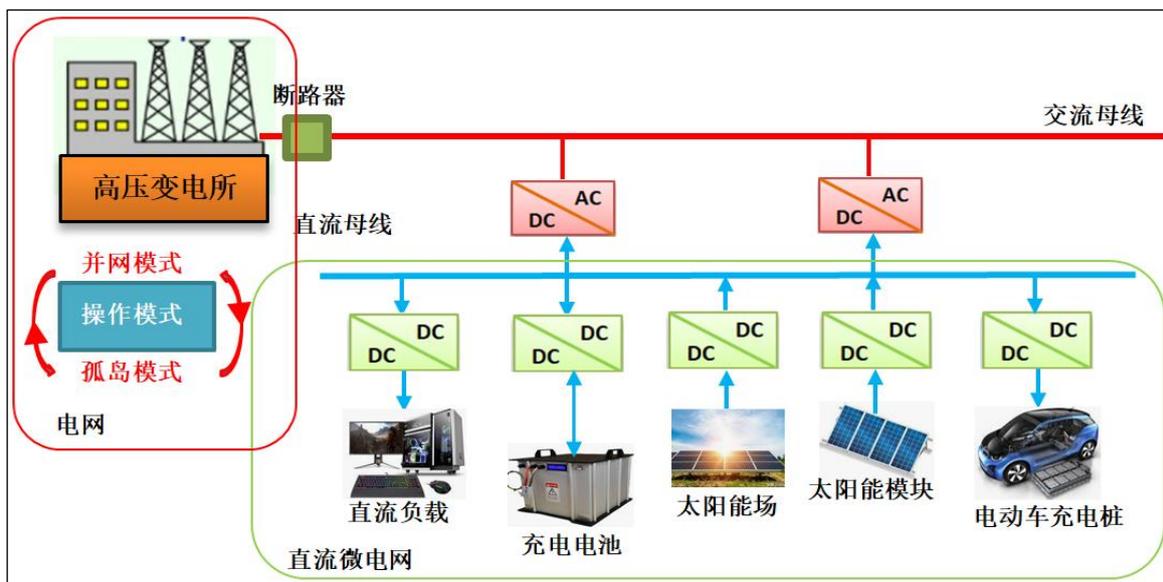


資料來源：本文自行整理

圖 1a. 交流耦合微電網結構圖

## 2.2 直流耦合混合微電網

圖 1b 顯示了一個直流耦合的混合微電網，其中分布式發電和電池能源存儲系統連接到公共直流母線，而接口轉換器用於鏈接直流和交流母線。當直流電源是微型計算機中的主要發電單元時，可以使用此結構。請注意，在此結構中，所有分布式發電和電池能源存儲系統都連接到直流母線。如果交流母線上有分布式發電和電池能源存儲系統，則這將是一個交流-直流耦合的混合微電網，稍後將進行討論。在此直流耦合微電網中，可將變頻交流負載（例如可調速電動機）通過交直流轉換器連接到直流母線（以避免為直流母線連接額外的交直流轉換）。在該系統中，接口轉換器在交流和直流母線之間提供雙向功率流。根據直流和交流母線之間的電源交換要求，通常使用並聯接口轉換器，以提高額定值和可靠性。



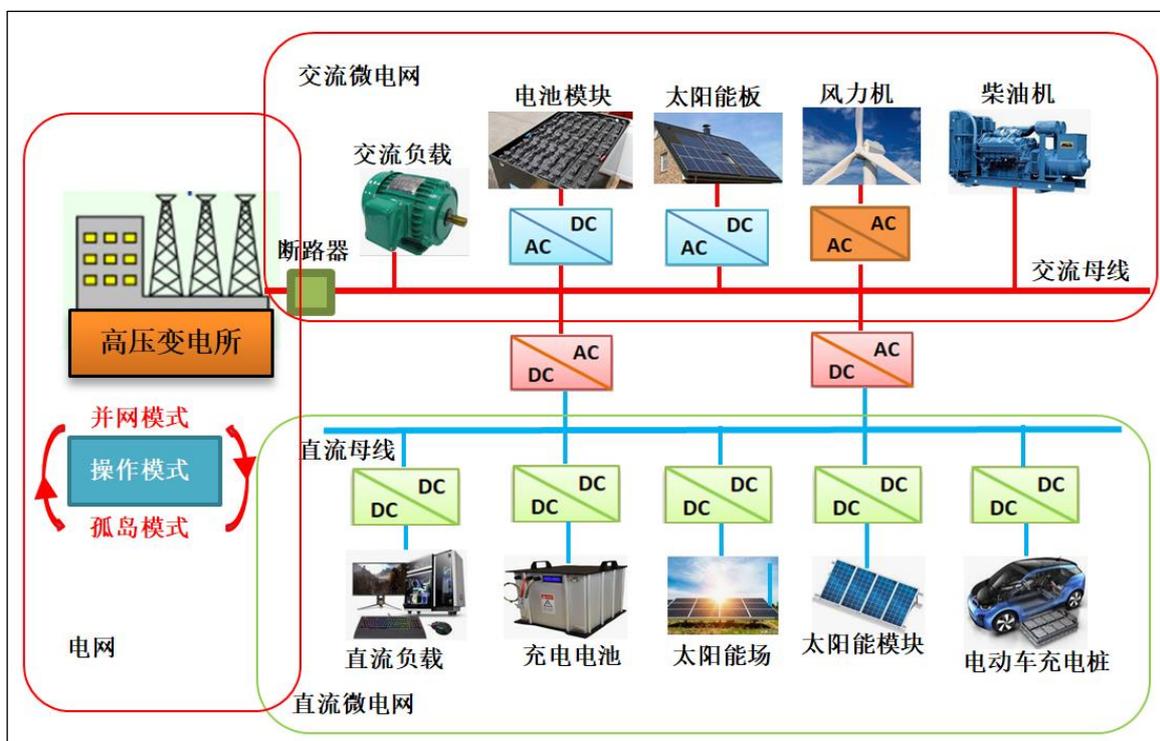
資料來源：本文自行整理

圖 1b. 直流耦合微電網結構圖

直流耦合微電網的特點是結構簡單，並且在集成不同的分布式發電時，不需要任何同步，但並行接口轉換器的控制和電源管理，以及它們的輸出電壓同步（彼此或與處於並網模式的電網同步）可能會帶來一些挑戰；此外，在直流耦合系統中，直流和交流電壓控制以及子系統電源管理都是必需的。在某些直流耦合混合微電網中，電池能源存儲系統不需要轉換器，就可以直接連接到直流母線，這會導致不同的控制方案，這些方法將在第三節中討論。

### 2.3 交直流混合微電網

交流-直流耦合混合微電網的結構如圖 2 所示。從該圖可以看出，直流和交流母線都具有分布式發電和電池能源存儲系統，並且這些母線通過互連轉換器鏈接。與直流耦合系統不同，交流-直流耦合混合微電網在交流母線上，也具有分布式發電和電池能源存儲系統，這就需要在直流和交流子系統之間，更多地進行電壓和功率控制的協調；另一方面，類似於直流耦合的微電網，需要並聯的互連轉換器以增加容量和可靠性來鏈接交流和直流母線如圖 2a。通常，如果主要電能同時包括直流和交流電能，則應考慮這種結構。通過將電能和負載連接到交流和直流母線，並以最小的功率轉換要求，這種結構提高了整體效率，並減少了功率轉換器的數量，從而降低了系統成本。考慮到這些好處，在不久的將來，交流-直流耦合的混合微電網將成為最有前途的微電網結構。歐洲通過歐洲超級電網，引領了這一領域的研究工作，在該超級電網中，各種直流和交流電能（如海上風力機和沙漠型太陽能）的電力，都通過交流和直流電網進行傳輸。儘管交流-直流耦合混合微電網的想法前景良好，但它仍需要進行深入的研究和調查，尤其是在能源和電能管理方面。這種系統的控制需要同時考慮直流和交流母線電壓（和頻率）控制，以及直流和交流子系統內的功率平衡。



資料來源：本文自行整理

圖 2. 交流-直流耦合混合微電網的結構圖

### 3. 混合型交直流微電網的控制方案和電能管理策略

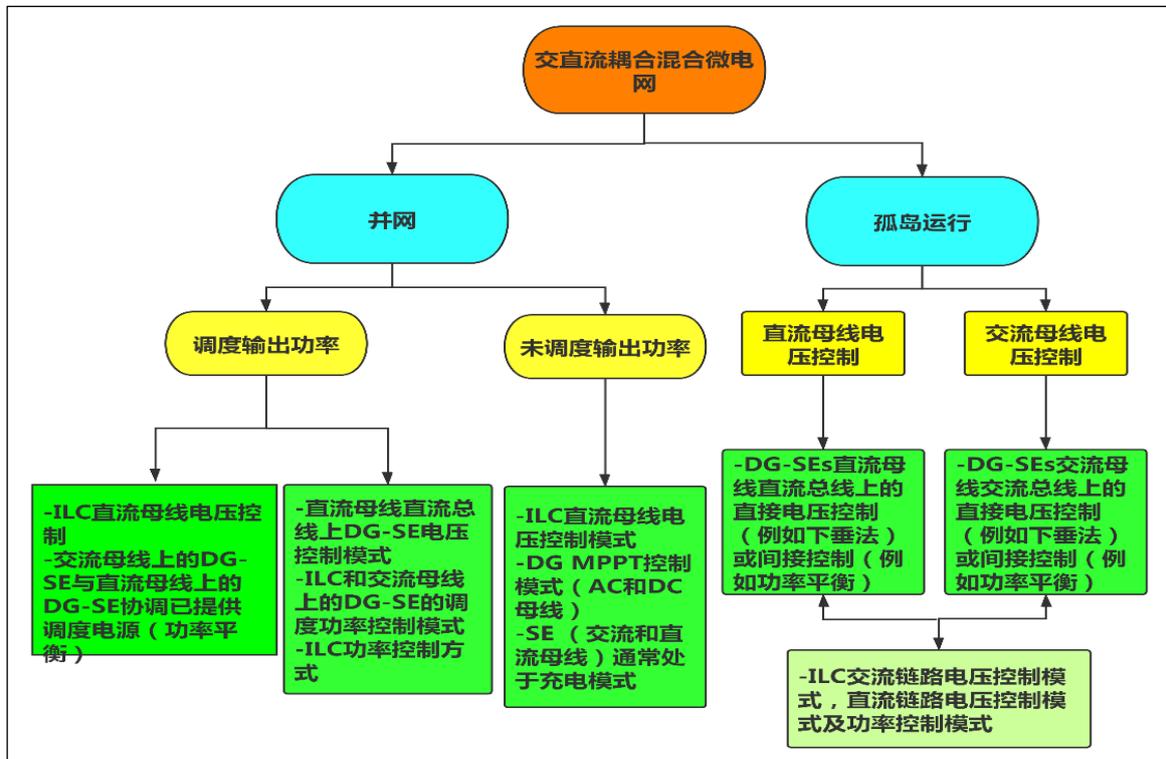
對於交直流混合微電網的運行，控制策略和電能管理方案是最重要的方面。電能管理策略確定分布式發電和電池能源存儲系統的輸出有功功率和無功功率，並同時控制電壓和頻率。本節介紹了針對不同類型的交/直流混合微電網的策略。

#### 3.1 交直流混合微電網

在交流-直流混合微電網中，多個分布式發電和電池能源存儲系統連接到交流和直流母線。因此，直流子系統和交流子系統之間需要更多的協調。在這些系統中，控制和電能管理策略需要考慮直流子系統和交流子系統中的功率平衡和電壓控制。交流-直流耦合混合微電網的電能管理與控制策略如圖 3 所示。

與直流耦合微電網的接口轉換器相似，交流直流耦合微電網中的互連轉換器，可以處於雙向功率控制模式，直流電壓控制模式或交流電壓控制模式。但是，電能和交流母線控制模式，需要互連轉換器與交流母線分布式發電和電池能源存儲系統之間的協調。

在具有調度的微電網輸出功率的並網運行模式中，可以使用兩種方法進行直流鏈路電壓控制和調度的發電。在第一種方法中，互連轉換器在直流鏈路電壓調節模式下工作，以將直流母線電壓設置為其所需的值。在這種模式下，必須產生直流母線的分布式發電-電池能源存儲系統，和交流母線的分布式發電-電池能源存儲系統之間的協調，才能產生分配的輸出功率。在第二種操作模式下，直流母線上的分布式發電-電池能源存儲系統調節，參考電壓的直流鏈路電壓，而交流母線上的互連轉換器和分布式發電-電池能源存儲系統，共同提供分配的功率(賈利虎,2017;邱進亮,2019)。在此操作模式下，互連轉換器在電能控制模式下工作。



資料來源：本文自行整理

圖 3. 交直流混合微電網的電源管理與控制策略架構圖

在並網的未分配輸出功率運行模式下，直流和交流母線中的分布式發電都在 MPP 上工作；此外，必要時對電池能源存儲系統進行充電或放電，以平滑注入電網的輸出功率。在這種模式下，互連轉換器將直流鏈路電壓調節到所需的值，並將直流母線中分布式發電-電池能源存儲系統產生的所有功率注入負載/電網。與混合微電網的其他結構類似，可以控制交流母線上的分布式發電和互連轉換器，以實現電網支持功能。

在孤島操作模式下，交流母線上的互連轉換器，分布式發電-電池能源存儲系統和直流母線上的分布式發電-電池能源存儲系統之間的協調，對於調節直流母線電壓，交流母線電壓和頻率，同時平衡微電網的總發電量和需求功率。在此操作模式下，交流耦合混合微電網在孤島操作模式下的電能管理策略，例如下垂控制（Chen & Xu, 2012），從可用於交流子系統的電壓和頻率調節以及需求功率共享（He 等, 2013）。對於直流子系統控制，類似於孤島運行中的直流耦合混合微電網，直流母線電壓可以直接由直流母線上的分布式發電-電池能源存儲系統控制（賈利虎, 2017；邱進亮, 2019），例如利用下垂控制（詹國敏等, 2019）。

要重點注意，在孤島運行模式下，互連轉換器在電能管理和控制中起著重要的作用（賈利虎, 2017；邱進亮, 2019）。根據交流和直流母線中使用的控制策略類型的不同，該轉換器可用於直流母線控制模式、交流母線控制模式或輸出功率控制模式。但是，最重要的目標是在交流母線、直流母線和互連轉換器控制策略之間進行協調。例如，在直流母線電壓由連接到直流母線的分布式發電-電池能源存儲系統控制，而交流母線電壓由連接到交流母線的分布式發電-電池能源存儲系統控制的情況下，互連轉換器負責管理交流和直流側之間的功率流為了使需求和發電量相等；同樣，在並聯互連轉換器的情況下，這些互連轉換器可以在不同的工作模式下工作：其中一些可以在直流鏈路電壓控制模式下工作，而其他的則可以在交流鏈路電壓控制模式，或電能控制模式下工作。

#### 4. 瞬態和不同負載條件下的電能管理策略

混合微電網功率管理策略，主要集中在穩態功率平衡和電壓/電流控制上。本節討論了微電網運行模式轉換期間，以及不同負載條件下的電能管理策略。

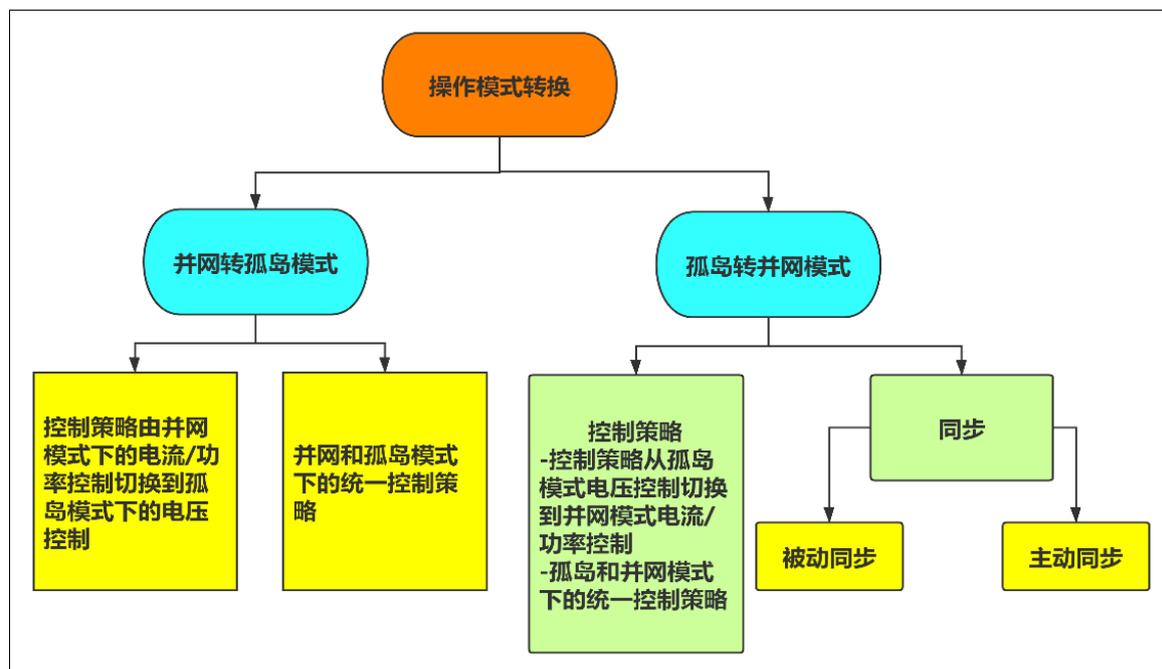
##### 4.1 並網和孤島運行模式之間轉換期間的電能管理

並網和孤島運行模式之間的過渡應無縫順暢，以最大程度地減小電壓和頻率干擾和偏差，並確保均衡的電流流動以防止分布式發電過載和循環功率。連接到孤島運行以及從孤島運行到並網運行的過渡將分別討論。這些轉換的概述如圖 4 所示。

從並網運行到孤島運行模式的轉變：微電網從並網運行到孤島運行的轉變主要有兩組控制方案：1) 控制策略從電流/功率的切換並網運行中的控制模式轉換為孤島運行中的電壓控制模式；2) 並網和孤島模式下的統一控制。

首先，在並網和孤島運行模式下，使用不同的控制策略，並且在這兩個控制器之間切換控制策略（Jelani & Molinas, 2013；Alaboudy 等, 2012；Kim 等, 2011；Kim 等, 2010；Karimi-Ghartemani, 2014）。尤其是分布式發電在並網運行模式下，以電流控制模式（MPPT 控制或調度的功率控制）工作，以向主電網注入功率，而電壓控制（下降法或常規電壓控制）在孤島運行模式下使用確保為敏感負載提供連續電力，並在壓控分布式發電之間共享負載需求。該控制切換可以應用於與 DC/DC 轉換器接口的分布式發電或能量存儲單元，與 DC/AC 轉換器接口的分布式發電或能量存儲單

元，以及接口或互連轉換器。為了無縫過渡，有許多最近提出的方法。例如，在切換到孤島的電壓控制模式之前，可以將分布式發電的線路電流減小到零（Jelani & Molinas, 2013；Alaboudy 等, 2012），也可以在不將分布式發電線路電流減小到零的情況下，進行更快的過渡。為了實現這一點，可以仔細協調電流控制器（在並網模式下）和電壓控制器（在孤島模式下）的控制狀態，以避免在過渡過程中出現瞬態電流或電壓尖峰（Kim 等, 2010；Kim 等, 2011；Karimi-Ghartemani, 2014）。



資料來源：本文自行整理

圖 4. 並網和孤島運行模式轉換期間的電能管理與控制架構圖

其次，電能管理和控制策略在並網和孤島運行模式下都是相同的，並且在過渡期間無需修改控制策略（Chen & Xu, 2012；Liu 等, 2011；Liutanakul 等, 2010；Lenz & Pagano, 2014；Lenz & Pagano, 2014；Majumder 等, 2010；Marx 等, 2012；Mohamed & Radwan, 2011）。因此，設計和實施魯棒的控制策略以在並網、孤島和瞬態模式下工作具有挑戰性。對於這組控制方法，孤島檢測算法在理論上不是必需的，但由於實用性要求以及為了獲得更好的控制性能，通常需要使用孤島檢測算法。該組可能包括在並網和孤島運行中，均以 MPPT 或電流控制模式工作的較小分布式發電單元。對於主要微電網電能的較大分布式發電和能量存儲單元，在操作模式中實施電壓控制模式以避免控制方案瞬變；但是，應該對電壓控制進行一些修改，以便在並網、孤島和暫態運行模式下使用它們（Chen & Xu, 2012；Liu 等, 2011）。例如，使用虛擬阻抗的概念對常規的下垂方法進行了修改，並將 PI 控制器與下垂控制相結合，可在並網和孤島運行模式下使用（Liu 等, 2011；Liutanakul 等, 2010；Lenz & Pagano, 2014）。作為另一個示例，Majumder 等（2010）對常規的分級控制進行了修改，以提高在微電網的兩種運行模式下，使用的常規電壓和功率共享控制器的弱干擾抑制性能。

在從並網運行到孤島運行模式的過渡中，可以包含同步單元的控制策略應在微電網中提供固定頻率的穩定電壓。此外，它應在分布式發電之間共享電力需求，以繼

續向微電網內的負載供電。分布式發電或能量存儲單元之間的瞬態功率共享，對於兩組控制策略都很重要，並且在孤島運行期間，電力電子接口的分布式發電，首先會佔據所有負載階躍的大部分，在某些情況下，存在瞬態負載共享不佳的情況分布式發電和傳統同步發電機的存在。為了改善瞬態功率共享，分布式發電和常規同步發電機之間的協調是必要的，並且分布式發電必須以增加的電壓和頻率驟降為代價，允許電壓和頻率擺動。例如，Matas 等（2011）針對下垂控制已修改了控制策略，以通過在過渡過程中改變下垂斜率，並將其恢復到穩態時的正常狀態，來改善暫態負載分配。

從孤島運行到並網控制模式的轉換：在從孤島運行到並網控制模式的轉換中，除了控制方案（從電壓年齡控制轉換為電流/功率控制或通過控制模式）統一控制方案（如前所述），一項重要任務是在重新連接之前，微電網電壓應與電網電壓同步。

為了使微電網與主電網同步，主要有兩種類型：被動同步和主動同步。對於無源同步，監視微電網電壓和主電網電壓，並且當兩個電網具有相同的相角時將其連接起來。此方法基於以下假設：微電網和主電網的電壓幅值非常接近且略有不同頻率（通常是這種情況）。到目前為止，被動同步是最簡單且可能是最實用的方法；但是，此方法在重新連接兩個電網時，導致一些瞬變（由於電壓大小不完全匹配），並且不能保證快速且可控制的同步過程。

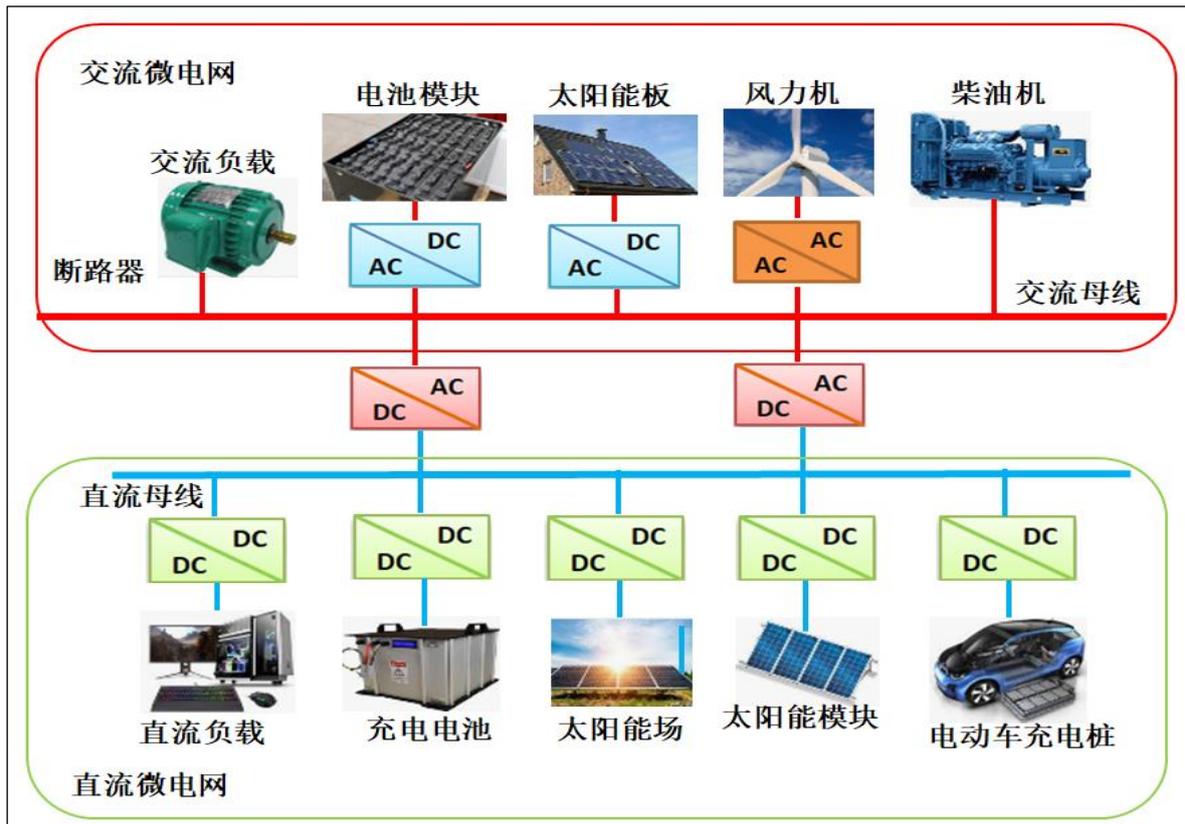
另一方面，主動同步可以實現微電網與主電網的快速同步和無縫連接，並吸引了相當多的研究工作；但是，由於微電網是由不同的再生能源和清潔替代能源的分布式發電、驟變的電負載以及存儲設備所組成，因此與單個傳統機器相比，微電網的同步是完全不同的。為了實現主動同步，需要協調多個分布式發電和能量存儲。在某些情況下，單獨的同步單元提供同步信號，以提供與電網的微電網重新連接。

如第三節前面所述，在孤島操作模式下，所有在電壓控制模式下工作的分布式發電（如對所有分布式發電應用的下垂控制或常規電壓控制模式），或者某些在電流控制模式下，基於再生能源的分布式發電在 MPPT 上運行，將所有分布式發電同時導入參與同步如下：

第一方案同步策略主要用於微電網，其中一些分布式發電在電流控制模式下工作，而其他分布式發電在電壓控制模式下工作（Mohamed & Radwan, 2011；Nejabatkhah & Li, 2015；Paquette & Divan, 2014）。例如，在 Nejabatkhah 與 Li (2015) 中，當基於再生能源的分布式發電處於其 MPP 模式時，主動同步應用於可控分布式發電，以控制微電網的頻率和電壓；在 Paquette 與 Divan (2014) 中，主從控制中使用的同步方案討論策略，其中主分布式發電主導同步過程。第二方案同步策略主要用於所有電網都在電壓控制模式下工作的微電網（Karimi-Ghartemani, 2014；Liu 等, 2011；Rahimi & Emadi, 2009）。例如，在 Liu 等 (2011) 和 Rahimi 與 Emadi (2009) 中，討論下垂控制方法中的同步策略，其中通過下垂特徵等值線調整，所有分布式發電的虛擬阻抗概念利用來實現同步；同步後，微電網將在零電壓交叉點處重新連接到電網。

#### 4.2 不同負載條件下的功率管理策略

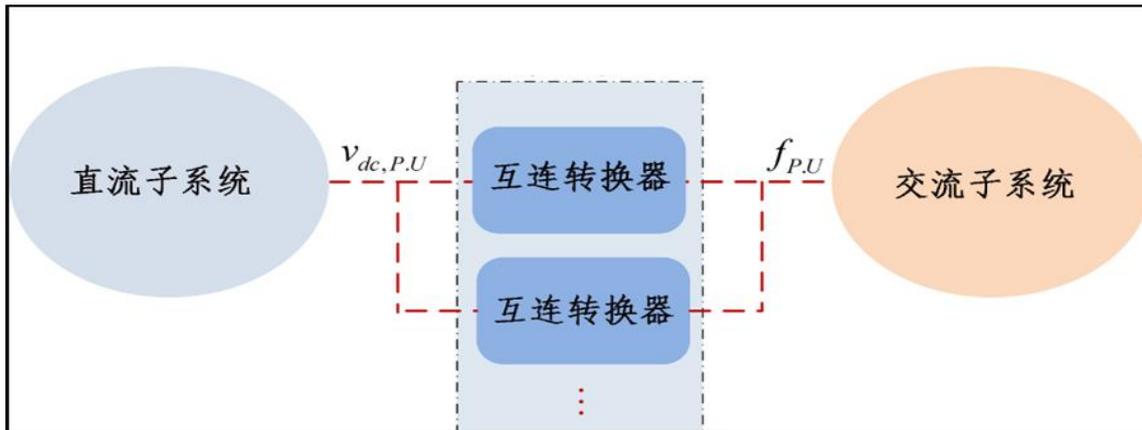
在交直流混合微電網孤島運行模式中如圖 5(a)所示，負載和（或）電網狀況可能會對微電網的性能產生重大影響。結果，在這些條件下需要魯棒的電流或電壓控制。在存在非線性/不平衡負載的情況下，這會導致 PCC 處的電壓不平衡，因此已使用了各種控制策略。



資料來源：本文自行整理

圖 5(a). 孤島運行模式之交直流混合微電網

另一方面，主要通過有源整流器連接到交流電網，或將 DC/DC 轉換器連接到直流電網的恒定功率負載，會由於其負阻抗特性而導致微電網不穩定的問題。這些問題已在不同的研究中，使用小信號方法和大信號方法進行了研究 (Paquette & Divan, 2014; Rahimi & Emadi, 2009)，並提出了各種解決方案以確保系統的穩定性。其中包括用於增加穩定性裕度的振盪補償技術 (Tan 等, 2013)，用於克服負阻抗不穩定性問題的有源阻尼技術 (Tan 等, 2012)，交流/直流轉換器的非線性控制等 (Vandoorn 等, 2013)。另外，在某些情況下，恒定功率負載被控制為微電網提供輔助服務，例如由電力電子非線性負載，並聯有源濾波器等引起的諧波最小化 (Wai 等, 2013)。除了會影響微電網穩定性的恒定功率負載之外，依賴於頻率和電壓的負載還會影響微電網的穩定性。已經證明，在孤島操作中，頻率和電壓偏差彼此相關，因此，由於負載的電壓和頻率依賴性，可能會導致微電網不穩定運行 (Yao 等, 2010)。例如，感應電動機是微電網中與頻率和電壓相關的負載，而傳統的 P/Q 控制策略無法保證微電網在這些負載下的穩定性 (Tao & Francois, 2011)。在存在依賴於頻率和電壓的負載的情況下，精確的負載模型對於控制系統設計至關重要，以增強穩定性和瞬態性能 (Li 等, 2011; Zhou 等, 2011; Zhong & Weiss, 2011)。提供了一個孤島運行模式下之直流和交流母線電壓調節的下垂控制案例 (賈利虎, 2017)。重要的是要注意，直流和交流母線中的功率共享在很大程度上取決於互連轉換器控制策略如圖 5(b)。



資料來源：Zeineldin 等，2009

圖 5(b). 在孤島運行模式下，採用自主互連轉換器控制之交直流混合微電網

## 5. 討論

考慮到基於直流電壓的可再生能源，儲能和直流負載以及現有的廣泛交流系統的普及率不斷提高；交流/直流混合微電網是未來電力系統中必不可少的部分。本文對不同的混合微電網結構，在不同操作和負載條件下，進行了電能管理方案以及實施案例之回顧和討論。在本文中，提供了有關交流/直流混合微電網未來趨勢的一些討論和建議如下：

### 5.1 交流/直流混合微電網的結構

在交流/直流混合微電網的不同結構中，由於其結構和控制方案簡單，迄今為止，交流耦合混合微電網一直是主要結構；但是隨著現代直流負載的增加以及並網連接更多可再生能源和必要性儲能系統，交直流耦合混合微電網是電力系統的未來趨勢。交流-直流耦合混合微電網可以減少電能轉換過程的數量，從而提高了整體效率並降低了成本。然而，在這些系統中，控制方案和電能管理策略是主要的關注和挑戰。由於分布式發電和電池能源存儲系統同時連接到交流和直流母線，因此在直流和交流子系統之間需要更多的協調。未來的交流-直流耦合微電網將在不同的電壓水平（如果有高頻鏈路，則可能是頻率）中，具有多個直流和交流母線。因此，交直流母線電壓和頻率控制，以及直流母線、交流母線和電網/負載內的功率平衡，是主要的電能管理挑戰和目標；此外，連接不同電壓水平的不同直流和交流母線的互連轉換器的操作，可能會成為將來有趣的研究課題。

### 5.2 電能質量問題

在未來的交流/直流微電網中，隨著來自分布式發電，電池能源存儲系統和負載的更多電力電子設備的連接，以及越來越多的非線性負載，電能質量將成為重要的話題。目前，諧波、不平衡和電壓驟降/驟升已經引起當今配電系統的擔憂；但是，隨著分布式發電/電池能源存儲系統接口轉換器利用率的提高，可以對其進行適當控制以幫助解決電能質量問題。因為混合微電網中的大多數分布式發電，電池能源存儲系統和互連或接口轉換器都不會一直以全額定值運行，尤其是考慮到再生能源的間歇性時；可用的轉換器額定值可以以一種聰明的方式使用，以幫助改善電能質量。因此，未來微電網系統諸如不平衡電壓補償、減輕閃爍、功率因數校正以及諧波補償等輔助的開發，可以是良好的研究方向。

### 5.3 互連轉換器和接口轉換器的並行操作

接口轉換器和互連轉換器，是混合微電網系統中交流和直流母線之間的關鍵鏈接，它們的控制是直流和交流子系統之間功率平衡的關鍵。由於與其他分布式發電或電池能源存儲系統的接口相比，要求更高的額定值，這些接口轉換器和互連轉換器通常將具有並行運行的並行轉換器。因此，這些轉換器的平行操作是值得進一步研究的課題。

對於並行轉換器，可以使用控制策略和瞬時電流共享方法，這在並行接口轉換器和互連轉換器時很重要；此外，如前所述，接口轉換器和互連轉換器可以處於電能控制模式，直流電壓控制模式或交流電壓控制模式，但並非所有並行接口轉換器或互連轉換器都可以在同一控制模式下一起工作。例如，對於交流-直流耦合的微電網，可能有一些互連轉換器控制直流鏈路電壓，一些互連轉換器控制交流鏈路電壓，有些互連轉換器控制平衡功率。這些組合控制策略需要進一步的研究。因此，在未來的研究中需要考慮並連接口轉換器或互連轉換器，在並網和孤島運行模式之間微電網過渡期間的性能。

### 5.4 不同負載/電網條件下的暫態電能管理

混合微電網的電能管理和控制策略在並網、孤島和過渡運行模式下應具有良好的性能；此外，並網運行模式和孤島運行模式之間的過渡應該是平滑且順暢的。另一方面，負載和/或電網狀況可能會對微電網的性能產生重大影響。儘管在不同的研究中已經分別考慮了這些挑戰，但考慮到真正的混合微電網，在未來的研究中仍需要進一步研究不同負載/電網條件下的暫態功率管理。

## 6. 結論

本文綜述了交流/直流混合微電網的結構和控制模型，討論了交流/直流混合微電網的各種結構，並給出了不同類型的混合微電網的實際案例。本文在不同的運行和負載條件下，對不同類型的微電網的不同控制模型和電能管理策略進行了全面的回顧和討論；另外，以一些控制模型的案例，更好地展示電能管理策略；最後，對交流/直流混合微電網的控制模型和電能管理策略未來研究方向；進行了討論和提出建議。

### 參考文獻

1. 劉暢、卓建坤、趙東明、李水清、陳景碩、王金星、姚強（2020）。利用儲能系統實現可再生能源微電網靈活安全運行的研究綜述。中國電機工程學報，40(1)，1-18+369。
2. 丁曉通（2020）。交直流混合微電網中互聯變流器的控制策略研究（未出版之碩士論文）。安徽省：合肥工業大學。
3. 楊立濱、宗鳴、李春來（2020）。考慮直流側電容存儲能量的風電機組虛擬慣性控制策略。可再生能源，38(6)，798-803。
4. 王萌萌（2016）。交直流混合微電網運行控制策略研究（未出版之碩士論文）。江蘇省：東南大學。
5. 張璐、唐巍、盧瑩、張博、張筱慧、趙春雪（2020）。面向新型源荷接入的交直流混合配電網關鍵技術研究綜述。供用電，37(10)，3-9+21。
6. 賈利虎（2017）。交直流混合微電網拓撲與控制策略研究（未出版之博士論文）。北京：華北電力大學。

7. 邱進亮(2019)。交直流混合微電網的運行及控制策略研究(未出版之碩士論文)。甘肅省：蘭州理工大學。
8. 詹國敏、肖遙、張弘、趙興國(2019)。風光柴儲智能微電網能量管理控制策略設計。電器與能效管理技術，19，83-90。
9. Alaboudy, A. K., Zeineldin, H. H., & Kirtley, J. L. (2012). Microgrid stability characterization subsequent to fault-triggered islanding incidents. *IEEE Trans. Power Del.*, 27(2), 658-669
10. Amelian, S. M., & Hooshmand, R. (2013). Small signal stability analysis of microgrids considering comprehensive load models-A sensitivity-based approach. in *Proc. IEEE Smart Grid Conf.*, 143-149.
11. Balaguer, I. J., Qin, L., Yang, S., Supatti, U., & Peng, F. Z. (2011). Control for grid-connected and intentional islanding operations of distributed power generation. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 58(1), 147-157.
12. Chen, D., & Xu, L. (2012). Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals. *IEEE Trans. Power Syst.*, 27(4), 1897-1905.
13. Du, W., Zhang, J., Zhang, Y., & Qian, Z. (2013). Stability criterion for cascaded system with constant power load. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(4), 1843-1851.
14. Etemadi, A., Davison, E., & Iravani, R. (2012). A decentralized control strategy for multi-DER microgrids part I-fundamental concept. *IEEE Trans. Power Del.*, 27(4), 1843-1853.
15. Fairley, P. (2013). Germany jump-starts the supergrid. *IEEE Spectrum.*, 50(5), 36-41.
16. Gordon, S. (2006). Supergrid to the rescue. *Power Eng.*, 20(5), 30-33.
17. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., Castilla, M., & De Vicuna, L. G. (2009). Control strategy for flexible microgrid based on parallel line-interactive UPS systems. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 56(3), 726-736.
18. Guerrero, J. M., Vasquez, J. C., Matas, J., De Vicuna, L. G., & Castilla, M. (2011). Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids-A general approach toward standardization. *IEEE Trans. Ind. Electronics.* 58(1), 158-172.
19. Gupta, A., Doolla, S., & Chatterjee, K. (2017). Hybrid AC-DC microgrid: Systematic evaluation of control strategies. in *IEEE Transactions on Smart Grid*, 1-1.
20. He, J., Yun, W. L., Guerrero, J. M., Blaabjerg, F., & Vasquez, J. C. (2013). An islanding microgrid power sharing approach using enhanced virtual impedance control scheme. *IEEE Trans. Power Electron.*, 28(11), 5272-5282.
21. Hertem, D. V., Ghandhari, M., & Delimar, M. (2011). Technical limitations towards a Supergrid-A European prospective. in *Proc. IEEE Energy Conf. Exhib.*, 302-309.
22. Jelani, N., & Molinas, M. (2013). Shunt active filtering by constant power load in microgrid based on IRP P-Q and CPC reference signal generation schemes. in *Proc. IEEE Power Syst. Technol. Conf.*, 1-6.
23. Jiang, Z., & Yu, X. (2009). Hybrid DC- and AC-linked microgrids: Towards integration of distributed energy resources. in *Proc. IEEE Energy 2030 Conf.*, 1-8.
24. Karimi-Ghartemani, M. (2014). Universal integrated synchronization and control for single-phase DC/AC converters. *IEEE Trans. Power Electron.*, 30(3), 1544-1557.
25. Kim, J., Guerrero, M. J., Rodriguez, P., Teodorescu, R., & Nam, K. (2011). Mode adaptive droop control with virtual output impedances for an inverter-based flexible AC microgrid. *IEEE Trans. Ind. Electron.*, 26(3), 689-702.
26. Kim, J. Y., Jeon, J. H., Kim, S. K., Cho, C., Park, J. H., Kim, H. M., & Nam, K. Y. (2010). Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation. *IEEE Trans. Power Electron.*, 25(12), 3037-

- 3048.
27. Lenz, E., & Pagano, D. J. (2014). Nonlinear control of a three-phase power converter with constant power load in a microgrid. in Proc. IEEE Power Electronics Conf., 27, 368-373.
  28. Li, Z., Wu, T., Yan, X., Kai, S., & Gurrero, J. M. (2011). Power control of DC microgrid using DC bus signaling. in Proc. 26th Annu. IEEE Appl. Power Electron. Conf. Expo., 1926-1932.
  29. Liu, X., Wang, P., & Loh, P. C. (2011). A Hybrid AC/DC microgrid and its coordination control. IEEE Trans. Smart Grid, 2(2), 278-286.
  30. Liutanakul, P., Awan, A. B., Pierfederici, S., Nahid-Mobarakkeh, B., & Meibody-Tabar, F. (2010). Linear stabilization of a DC bus supplying a constant power load: A general design approach. IEEE Trans. Power Electron., 25(2), 475-488.
  31. Majumder, R., Chaudhuri, B., Ghosh, A., Ledwich, G., & Zare, F. (2010). Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop. IEEE Trans. Power Del., 25(2), 796-808.
  32. Marx, D., Magne, P., Nahid-Mobarakkeh, B., Pierfederici, S., & Davat, B. (2012). Large signal stability analysis tools in DC power systems with constant power loads and variable power loads-A review. IEEE Trans. Power Electron., 27(4), 1773-1787.
  33. Matas, J., Castilla, M., Vicuna, A. L. G., Miret, J., & Vasquez, J. C. (2011). Virtual impedance loop for droop-controlled single-phase parallel inverters using a second-order general-integrator scheme. IEEE Trans. Power Electron., 25(12), 2993-3002.
  34. Mohamed, A. R. I., & Radwan, A. A. (2011). Hierarchical control system for robust microgrid operation and seamless mode transfer in active distribution systems. IEEE Trans. Smart Grid, 2(2), 352-362.
  35. Nejabatkhah, F., & Li, Y. W. (2015). Overview of power management strategies of hybrid AC/DC microgrid. in IEEE Transactions on Power Electronics, 30(12), 7072-7089, 10.1109/TPEL.2014.2384999.
  36. Paquette, A., & Divan, D. (2014). Transient droop for improved transient load sharing in microgrids. in Proc. IEEE Energy Conver. Congr. Expo. Conf., 84-91.
  37. Rahimi, A. M., & Emadi, A. (2009). Active damping in DC/DC power electronic converters: A novel method to overcome the problems of constant power loads. IEEE Trans. Ind. Electron., 56(5), 1428-1439.
  38. Tan, K. T., Peng, X. Y., So, P. L., Chu, Y. C., & Chen, M. Z. Q. (2012). Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids. IEEE Trans. Smart Grid, 3(4), 1977-1987.
  39. Tan, K. T., So, P. L., Chu, Y. C., & Chen, M. Z. Q. (2013). Coordinated control and energy management of distributed generation inverters in a microgrid. IEEE Trans. Power Delivery, 28(2), 704-713.
  40. Tao, Z., & Francois, B. (2011). Energy management and power control of a hybrid active wind generator for distributed power generation and grid integration. IEEE Trans. Ind. Electron., 58(1), 95-104.
  41. Vandoorn, T. L., Meersman, B., De Kooning, J. D. M., & Vandeveldel, L. (2013). Transition from islanded to grid-connected mode of microgrids with voltage-based droop control. IEEE Trans. Power Syst., 28(3), 2545-2553.
  42. Wai, R. J., Lin, C. Y., Huang, Y. C., & Chang, Y. R. (2013). Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation applications, IEEE Trans. Ind. Electron., 60(4), 1542-1555.
  43. Yao, Z., Lan, X., & Yan, Y. (2010). Seamless transfer of single-phase grid-interactive inverters between grid-connected and stand-alone modes. IEEE Trans. Power Electron.,

- 25(6), 1597-1603.
44. Zeineldin, H. H., & Kirtley, J. L. (2009). Micro-grid operation of inverter based distributed generation with voltage and frequency dependent loads. in Proc. IEEE Power Energy Soc. Gen. Meeting, 1-6.
  45. Zhong, Q. C., & Weiss, G. (2011). Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. IEEE Trans. Ind. Electron., 58(4), 1259-1267.
  46. Zhou, H., Bhattacharya, T., Tran, D., Siew, T., & Khambadkone, A. M. (2011). Composite energy storage system involving battery and ultracapacitor with dynamic energy management in microgrid applications. IEEE Trans. Power Electron., 26(3), 923-930.

收稿日期：2021-08-21  
責任編輯、校對：秦依漫、林嘉盈