

Tang, Fen; Wu, Dan; Zhou, Xiao; Guerrero, Josep M.; Jia, Limin

Published in:
Dianwang Jishu

DOI (link to publication from Publisher):
[10.13335/j.1000-3673.pst.2014.09.008](https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2014.09.008)

Publication date:
2014

Document Version
Early version, also known as pre-print

[Link to publication from Aalborg University](#)

Citation for published version (APA):
Tang, F., Wu, D., Zhou, X., Guerrero, J. M., & Jia, L. (2014). . *Dianwang Jishu*, 38(9), 2363-2370.
<https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2014.09.008>

General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal -

Take down policy

If you believe that this document breaches copyright please contact us at vbn@aub.aau.dk providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

分布式多变流器型微电网无互联线潮流控制

唐芬^{1a}, 吴丹², 周啸^{1a}, Guerrero Josep M.², 贾利民^{1b}

(1. 北京交通大学 a. 国家能源主动配电网技术研发中心, b. 轨道交通控制与安全国家重点实验室, 北京市海淀区 100044; 2. 丹麦奥尔堡大学能源技术系, 丹麦奥尔堡 9220)

Wireless Autonomous Power Flow Control in Converter-Fed Microgrids

TANG Fen^{1a}, WU Dan², ZHOU Xiao^{1a}, GUERRERO Josep M.², JIA Limin^{1b}

(1. a. National Active Distribution Network Technology Research Center, b. State Key Laboratory of Rail Traffic Control and Safety, Beijing Jiaotong University, Haidian District, Beijing 100044, China; 2. Department of Energy Technology, Aalborg University, Aalborg 9220, Denmark)

ABSTRACT: When total apparent power of the energy storage system (ESS) interfacing converter is fixed, the higher the requirement on reactive power in the microgrid system with distributed multiple converters, the weaker the ability of ESS to balance the active power between distributed generators and loads is. To reduce this limitation on ESS, a wireless power flow control method, which autonomously utilizes all potential distributed reactive compensation sources to supply reactive power needed by loads to mitigate the pressure of reactive power adjustment, is proposed. Droop control and reversed droop control are integrated to implement rational power allocation among voltage controlled mode and current controlled mode converters. Meanwhile, the factors impacting the accuracy of reactive power allocation are analyzed, and a method based on the combination of virtual impedance with adaptive no-load voltage compensation is proposed to improve the accuracy of reactive power allocation. Finally, real time hardware-in-the-loop results are presented to show the feasibility of proposed control strategy.

KEYWORDS: microgrid; autonomous power distribution; virtual impedance; coordinated control

摘要: 当储能系统接口变流器的视在功率一定时, 分布式多变流器型微电网系统内无功功率需求越大, 储能系统对电源与负荷之间有功供需平衡的调节能力越弱。针对该问题, 提出了一种无互联线潮流控制方法。该方法利用微电网系统内所有潜在的分布式无功补偿源提供负荷所需无功, 以期减小储能系统功率调节压力。并通过下垂控制与倒下垂相结合的方法来实现电压控制模式与电流控制模式变流器间功率的合理分配。同时, 分析了影响功率分配精度的因素, 提出基于虚拟阻抗与自适应空载电压补偿相结合的方法改善无功功率分配精度。最后通过实时硬件在环平台验证了所提控制策略的可行性。

关键词: 微电网; 自治功率分配; 虚拟阻抗; 协调控制

DOI: 10.13335/j.1000-3673.pst.2014.09.008

0 引言

近几年, 微电网概念备受关注, 被视为利用分布式能源的最佳途径^[1-3]。根据标准 IEEE 1547.4^[4], 微电网从概念上讲, 一般是指由分布式资源 (distributed resource, DR) 和本地负荷组成的电气上互联、控制上协调运行, 具有自我控制、保护和管理的小型发配电系统。DR 一般包括分布式发电 (distributed generator, DG) 和分布式储能 (distributed storage, DS), 或者两者的组合。根据 DR 系统接入微电网的方式, 其可分为旋转电机接口和变流器接口 2 种形式^[5-6]。其中接口变流器常采用电压源变流器 (voltage source converter, VSC), 其控制策略常可分为电压控制模式 (voltage controlled mode, VCM) 和电流控制模式 (current controlled mode, CCM)^[7-9]。

在分布式多变流器型微电网中, 为最大化能源利用效率, DG 中的可再生能源如光伏发电、风力发电系统接口变流器的控制模式一般采用 CCM, 并根据最大功率跟踪算法产生功率指令, 且常运行于单位功率因数^[10]。而 DS 可在微电网孤岛运行工况下提供供需功率平衡和电压支撑, 控制模式一般采用 VCM。基于此, 微电网处于孤岛运行工况下, 系统内的无功需求将由 DS 系统提供。这样, 在变流器视在功率一定的情况下, 微电网系统内无功需求越大时, 则 DS 对电源与负荷之间有功供需平衡的调节能力将越弱。

另一方面, 随着分布式发电技术的发展, 国内外 DG 和微电网并网标准开始要求可再生能源具备无功控制和电压调节能力^[11], 允许 DG 参与公共连

基金项目: 国家 863 高技术基金项目 (2011AA05A306)。

The National High Technology Research and Development of China 863 Program (2011AA05A306)。

接点(point of common coupling, PCC)电压调节^[6, 12]。因此, 这些 DG 将可看成微电网系统内的分布式无功功率补偿装置。

基于此, 国内外学者开始探讨利用这些分布式无功补偿装置辅助 PCC 点电压调节的控制研究。其中针对变流器无功控制策略的研究较多, 主要有: 恒无功功率 Q 控制^[13-14]、恒功率因数 $\cos\varphi$ 控制^[14-15]、基于有功输出 P 的 $\cos\varphi(P)$ 控制^[14]、基于并网点电压幅值 U 的 $Q(U)$ 控制策略^[14, 16]及基于并网点电压幅值与有功出力 $Q(U, P)$ ^[17]等。但研究大多集中在 DG 自身和接口变流器的无功功率控制上。很少从系统(微电网)层面上来协调整个微电网系统内的无功功率潮流。

多台 VSC 并联运行时, 其控制方法有主从控制、集中控制、平均负载分配等基于有互联线的控制方法, 这类方法以高速数字通信或模拟信号形式实现对负载功率的分配, 虽然能够得到较好的负载分配效果, 但是降低了系统的灵活性与可靠性。针对该问题, 基于下垂控制的无互联线方法被广泛应用于 VCM-VSC 中^[18-20], 其仅依赖变流器的本地信息, 通过预设的下垂曲线来分配负载功率, 达到了较好的功率分配效果。然而该方案很难直接应用于基于 CCM-VSC 控制的 DR 上。

基于以上分析, 本文从系统层面出发, 提出一种分布式多变流器型微电网无互联线潮流控制方法。该方法利用微电网系统内所有潜在的分布式无功补偿源提供负荷所需无功, 以期减小储能系统功率调节压力, 实现系统潮流合理分配。本文首先对微电网系统进行建模。针对 VCM-VSC 和 CCM-VSC 控制特点, 提出了适用于 CCM-VSC 的倒下垂控制来实现 CCM-VSC 间的功率分配。通过合理设置 CCM-VSC 倒下垂系数与 VCM-VSC 下垂系数实现潮流在基于这 2 种接口变流器的 DR 间的合理分配。其次, 对功率分配精度进行分析, 给出影响功率分配精度的因素。为改善 VCM-VSC 无功分配的精度和控制稳定性, VCM-VSC 常采用虚拟阻抗控制, 其将影响无功在 VCM-VSC 和 CCM-VSC 间的分配。为了解决该问题, 本文提出虚拟阻抗与自适应空载电压补偿相结合的方法来实现潮流在 VCM-VSC 和 CCM-VSC 间精确分配。

1 微电网系统建模

典型的微电网结构如图 1 所示, 根据转换开关状态的不同, 微电网可运行于并网或孤岛模式。分布式多变流器型微电网系统以基于变流器接口的

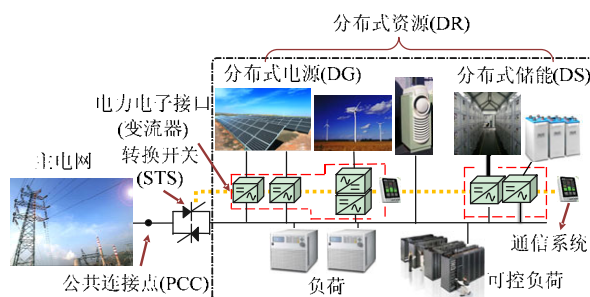


图 1 典型微电网结构

Fig. 1 Typical microgrid configuration

DR 系统为主导, 本文重点对此展开研究。根据戴维宁和诺顿定理, 接口为 VCM-VSC 的 DR 系统可等效为电压源 U_V 和阻抗 z_V 串联的电路, 而接口为 CCM-VSC 的 DR 系统则可以等效为电流源 I_C 与阻抗 z_C 并联的电路。因此, 图 1 可简化为如图 2 所示的等效电路, 其中, n 、 m 分别表示微电网系统内 VCM-VSC 和 CCM-VSC 台数, 不同 VCM-VSC 和 CCM-VSC 的相关变量用数字下标加以区分; z_{LV} 为 VCM-VSC 到 PCC 点等效线路阻抗(包含 VCM-VSC 滤波器中网侧电感); z_{LC} 为 CCM-VSC 电压采样点到 PCC 点的等效阻抗; U_{cV} 表示 VCM-VSC 电压矢量; U_g 表示 CCM-VSC 采样点电压矢量; i_{oV} 、 i_{oC} 分别为 VCM-VSC 和 CCM-VSC 输出电流矢量; U_{MG} 表示微电网母线电压矢量。

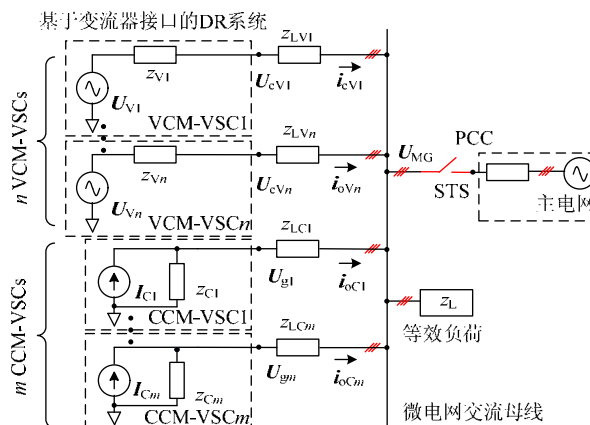


图 2 简化的微电网结构

Fig. 2 Simplified microgrid configuration

2 无互联线潮流控制

本节针对 VCM-VSC 和 CCM-VSC 控制特点, 研究适用于这 2 种接口变流器的无互联线潮流控制, 以期实现潮流在基于这 2 种接口变流器的 DR 间的合理分配。

2.1 适用于 VCM-VSC 的下垂控制

假设线路阻抗为感性(目前 VSC 常采用 LCL 滤波器, 因为网侧电感的存在, 假设一般成立或者可通过虚拟阻抗的设计来保证), VCM-VSC 常采用 $P-\omega$ 、 $Q-U$ 下垂控制来实现 VCM-VSC 之间的有功

与无功功率分配。其控制方程为

$$\begin{cases} \omega_V = \omega_V^{\text{ref}} - k_{pV} P_{mV} = \omega_V^{\text{ref}} - k_{pV} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} P_V \\ U_V = U_V^{\text{ref}} - k_{qV} Q_{mV} = U_V^{\text{ref}} - k_{qV} \frac{\omega_c}{s + \omega_c} Q_V \end{cases} \quad (1)$$

式中 ω_V 、 U_V 、 ω_V^{ref} 、 U_V^{ref} 、 k_{pV} 、 k_{qV} 、 P_V 、 Q_V 、 P_{mV} 、 Q_{mV} 、 ω_c 分别为输出角频率和相电压幅值、空载角频率和电压幅值、角频率和电压下垂增益、滤波前后有功功率和无功功率以及滤波器截止角频率。

稳态时，微电网系统工作于同一频率，忽略线路阻抗压降，则所有 VCM-VSC 具有同一 ω_V 、 U_V 。

若 ω_V^{ref} 、 U_V^{ref} 一致，则

$$\begin{cases} P_{mV1} : P_{mV2} \cdots : P_{mVn} = \frac{1}{k_{pV1}} : \frac{1}{k_{pV2}} \cdots : \frac{1}{k_{pVn}} \\ Q_{mV1} : Q_{mV2} \cdots : Q_{mVn} = \frac{1}{k_{qV1}} : \frac{1}{k_{qV2}} \cdots : \frac{1}{k_{qVn}} \end{cases} \quad (2)$$

式中下标数字含义同图 2。

可见，合理设置下垂系数，即可实现有功与无功功率的按需分配。常采用按 DR 系统容量设置下垂系数。且下垂系数需满足以下条件

$$\begin{cases} 0 < k_{pV} \leq \frac{\Delta \omega}{P_{\max V}} \\ 0 < k_{qV} \leq \frac{\Delta U}{Q_{\max V}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： ω 和 U 分别为系统允许的最大角频率和电压幅值偏差； $P_{\max V}$ 和 $Q_{\max V}$ 分别为每个单元允许输出的最大有功和无功功率值。

2.2 适用于 CCM-VSC 的倒下垂控制

基于 VCM-VSC 的下垂控制思想，本文提出适用于 CCM-VSC 的倒下垂控制方法来实现 CCM-VSC 之间的有功与无功功率分配。该类 CCM-VSC 分为 2 种形式：

1) 采用 ω - P 、 U - Q 倒下垂控制。

该类方法可应用于 CCM-VSC 有功和无功功率调节能力不受 DR 系统一次资源(如光伏、风电系统)环境条件的限制，如可再生能源过剩，DR 处于限功率运行工况，可以在限定的功率范围内自由调配的情况。该方法控制方程为

$$\begin{cases} P_C = k_{pC}(\omega_C^{\text{ref}} - \omega_g) \\ Q_C = k_{qC}(U_C^{\text{ref}} - U_g) \end{cases} \quad (4)$$

式中 ω_g 、 U_g 、 ω_C^{ref} 、 U_C^{ref} 、 k_{pC} 、 k_{qC} 、 P_C 、 Q_C 分别为 CCM-VSC 变流器网侧电压采样点母线电压角频率和幅值、空载角频率和电压幅值、角频率和电压倒下垂增益、有功功率和无功功率指令。

稳态时，微电网系统工作于同一频率，忽略线

路压降，则 CCM-VSC 检测的网侧母线电压约等于微电网交流母线电压，若 ω_C^{ref} 、 U_C^{ref} 一致，则有

$$\begin{cases} P_{C1} : P_{C2} \cdots : P_{Cm} = k_{pC1} : k_{pC2} \cdots : k_{pCm} \\ Q_{C1} : Q_{C2} \cdots : Q_{Cm} = k_{qC1} : k_{qC2} \cdots : k_{qCm} \end{cases} \quad (5)$$

式中下标数字含义同图 2。

可见，合理设置倒下垂系数，即可实现有功与无功功率按需分配。

针对同时含有 VCM-VSC 和 CCM-VSC 的微电网，稳态时系统工作于同一角频率，即 $\omega_g = \omega_V$ 。忽略线路阻抗压降，则理想工况下，有 $U_g = U_V$ 成立。若需实现同等容量的 VCM-VSC 和 CCM-VSC 均载分配，则只需预设 $\omega_V^{\text{ref}} = \omega_C^{\text{ref}}$ 、 $U_V^{\text{ref}} = U_C^{\text{ref}}$ 、 $k_{pV} k_{pC} = 1$ 且 $k_{qV} k_{qC} = 1$ 即可，其中，上标 ref 的含义是参考值。则由式(1)(4)可得，此时 $P_{mV} = P_C$ 且 $Q_{mV} = Q_C$ 。

2) 有功功率按照 DR 一次资源特性分配，无功功率按照剩余容量倒下垂控制运行。

当 CCM-VSC 用于可再生能源时，为了最大化能源利用，常采用最大功率点跟踪控制。因此有功功率输出受限于当前 DR 系统一次资源。同时，在视在功率一定的情况下，该系统当前具有的无功储备也随着有功功率的变化而变化。令 S_C 为系统额定视在功率， P_{MPPT} 为系统当前最大功率点，则 DR 系统的无功储备为

$$Q_{\max C} = \sqrt{S_C^2 - P_{MPPT}^2} \quad (6)$$

在这种情况下，本文提出其一次控制方程为

$$\begin{cases} P_C = P_{MPPT} \\ Q_C = k_{qC}(U_C^{\text{ref}} - U_g) \end{cases} \quad (7)$$

若 U_C^{ref} 一致，则功率分配关系为

$$\begin{cases} P_{C1} : P_{C2} \cdots : P_{Cm} = P_{MPPT1} : P_{MPPT2} \cdots : P_{MPPTm} \\ Q_{C1} : Q_{C2} \cdots : Q_{Cm} = k_{qC1} : k_{qC2} \cdots : k_{qCm} \end{cases} \quad (8)$$

k_{qC} 依据 $Q_{\max C}$ 而定，为

$$k_{qC1} : k_{qC2} \cdots : k_{qCm} = Q_{\max C1} : Q_{\max C2} \cdots : Q_{\max Cm} \quad (9)$$

且满足

$$0 < k_{qC} \leq \frac{Q_{\max C}}{\Delta U} \quad (10)$$

同理，忽略线路压降，有 $U_g = U_V$ 。若需实现同等无功容量的 VCM-VSC 和 CCM-VSC 的无功均载分配，则只需使 $U_V^{\text{ref}} = U_C^{\text{ref}}$ 和 $k_{qV} k_{qC} = 1$ 即可。

3 功率分配精度分析及改善

由于稳态时，系统工作于同一角频率，所以有功功率分配精度较高。然而由于线路压降，各节点电压幅值略有差异，从而导致无功功率不能按照需求精确分配，本节将重点针对该问题进行分析并提

出改善方法。

3.1 改善 VCM-VSC 分配精度的虚拟阻抗控制

VCM-VSC 通过内环控制器实现对电压指令的跟踪,其内环控制器参数与戴维宁电路等效电压源矢量和串联阻抗关系为

$$\begin{cases} U_V = G_{cV} U_{Vref} \\ z_V = z_{cV} \end{cases} \quad (11)$$

式中: U_{Vref} 为下垂控制给出的电压指令; G_{cV} 为内环控制器增益; z_{cV} 为控制器闭环等效阻抗。

由图 2 可知,微电网母线电压为

$$U_{MG} = G_{cV} U_{Vref} - (z_V + z_{LV}) i_{oV} \quad (12)$$

若不采用虚拟阻抗,内环控制器的设计常使 G_{cV} 和 z_{cV} 在基波角频率点的值分别约为 1 和 0^[21]。因此,式(12)可以简化为

$$U_{MG} \approx U_{Vref} - z_{LV} i_{oV} \quad (13)$$

由于各分布式 DR 系统到 PCC 点距离不同,则等效的线路阻抗 z_{LV} 难免有差异。由式(13)可知,若设置所有 VCM-VSC 的 U_{Vref} 相等,则会导致输出电流的差异,其差值取决于线路阻抗。

由式(1)可得,当 2 台 VCM-VSC 下垂系数一致时,2 台变流器无功差值 Q_{mVdif} 为

$$Q_{mVdif} = Q_{mV1} - Q_{mV2} = [(U_{V1}^{ref} - U_{V2}^{ref}) - (U_{V1} - U_{V2})] / k_{qV} \quad (14)$$

可见,无功功率差值取决于下垂系数、空载电压指令差值和实际因为线路阻抗导致的电压差值。为改善无功分配精度,可以通过有互联线方式适当调整空载电压幅值或者采用无互联线虚拟阻抗形式^[21-22]减小 2 个电源到 PCC 点之间等效阻抗差值。

为简化计算,忽略线路的阻性部分,并令 X_{LV} 为线路感抗,则由图 2 可知

$$U_V - U_{MG} \approx Q_{mV} X_{LV} / (1.5 U_{MG}) \quad (15)$$

联立式(1)(15)可得

$$Q_{mV} \approx \frac{U_V^{ref} - U_{MG}}{k_{qV} + X_{LV} / (1.5 U_{MG})} \quad (16)$$

若需 2 台 VSC 均分无功功率,定义无功功率分配误差 δ 为 2 台无功功率差值与无功功率平均值的比值,以此来衡量无功功率控制精度。可见, $0 \leq |\delta| \leq 2$, 且 $|\delta|$ 越小,表明无功功率控制精度越高。若 $|\delta|$ 为 0,则表明无功功率实现了完全均分。当 2 台 VCM-VSC 下垂系数和 U_V^{ref} 一致时,由式(16)可得,2 台 VCM-VSC 的分配误差 δ_V 为

$$\delta_V = \frac{Q_{mV1} - Q_{mV2}}{0.5(Q_{mV1} + Q_{mV2})} \approx \frac{X_{LV2} - X_{LV1}}{1.5 k_{qV} U_{MG} + 0.5(X_{LV2} + X_{LV1})} \quad (17)$$

可见,线路阻抗差异和下垂系数影响功率分配精度。为改善分配精度,本文采用虚拟阻抗方法。此时,闭环等效阻抗 z_{cV} 约等于虚拟阻抗设计值 z_{rV} , 则 $z_V \approx z_{rV}$ 。在本文中, z_{rV} 设计以保证线路阻抗的感性特征和系统稳定为目标。设置感性虚拟阻抗,其感抗值为 X_{rV} ,则总感抗 $X_T = X_{rV} + X_{LV}$ 。由图 2 和式(1)(15)可得

$$\begin{cases} Q_{mV} \approx \frac{U_V^{ref} - U_{MG}}{k_{qV} + X_T / (1.5 U_{MG})} \\ \delta_V \approx \frac{X_{LV2} - X_{LV1}}{1.5 k_{qV} U_{MG} + 0.5(X_{T1} + X_{T2})} \end{cases} \quad (18)$$

可见,通过虚拟阻抗法可有效减小功率分配误差,提高无功功率分配精度。

同理,若 2 个 DR 容量不等时,预设 $U_{V1}^{ref} = U_{V2}^{ref}$, 则无功功率分配误差为

$$\delta_V = \frac{k_{qV1} Q_{mV1} - k_{qV2} Q_{mV2}}{0.5(k_{qV1} Q_{mV1} + k_{qV2} Q_{mV2})} \approx \frac{k_{qV1} X_{T2} - k_{qV2} X_{T1}}{1.5 k_{qV1} k_{qV2} U_{MG} + 0.5(k_{qV1} X_{T2} + k_{qV2} X_{T1})} \quad (19)$$

若预先设置虚拟阻抗,满足 $k_{qV1} X_{rV1} = k_{qV2} X_{rV2}$, 则可有效改善无功功率分配精度。

3.2 CCM-VSC 间的功率分配精度分析

CCM-VSC 通过内环控制器实现对功率或者电流指令的跟踪,常用诺顿等效电路表示。内环控制器参数与诺顿电路等效电流源和阻抗关系为

$$\begin{cases} I_C = G_{cc} I_{cref} \\ z_C = 1 / g_{cc} \\ i_{oC} = G_{cc} I_{cref} - g_{cc} U_g \end{cases} \quad (20)$$

式中: I_{cref} 为式(4)或式(7)计算的电流指令; G_{cc} 为内环控制器增益; g_{cc} 为闭环控制系统等效导纳。

由图 2 可得

$$U_g = i_{oC} z_{LC} + U_{MG} \quad (21)$$

则由式(20)(21)可得

$$i_{oC} = [G_{cc} / (1 + g_{cc} z_{LC})] I_{cref} - [g_{cc} / (1 + g_{cc} z_{LC})] U_{MG} \quad (22)$$

内环控制器的设计常使 G_{cc} 和 g_{cc} 在基波角频率点的值分别约为 1 和 0。若所给的电流指令一致,则能实现 CCM-VSC 间较好的均流特性。

3.3 VCM-VSC 与 CCM-VSC 间的无功分配精度改善控制

令 Q_{mC} 为 CCM-VSC 计算的无功功率值,假设 CCM-VSC 的功率反馈能够准确跟踪功率指令,即 $Q_{mC} \approx Q_C$ 。由式(1)(4)可得,若 $k_{qV} k_{qC} = 1$ 成立,则 VCM-VSC 和 CCM-VSC 之间的无功功率差值为

$$Q_{VCdif} = Q_{mV} - Q_{mC} \approx Q_{mV} - Q_C = \frac{[(U_V^{ref} - U_C^{ref}) - (U_V - U_g)]}{k_{qv}} \quad (23)$$

可见,其值取决于空载电压差异和因为线路阻抗导致的电压差异以及下垂系数。

对于 CCM-VSC,忽略线路的阻性部分,并令 X_{LC} 为线路感抗,则

$$U_g - U_{MG} \approx Q_{mC} X_{LC} / (1.5 U_{MG}) \quad (24)$$

若 $U_V^{ref} = U_C^{ref}$,由式(4)(7)(15)(18)(23)(24)可得

$$\begin{cases} Q_{VCdif} = \frac{Q_{mC} X_{LC} - Q_{mV} X_T}{1.5 U_{MG} k_{qv}} \approx -\frac{Q_{mV} X_{vrV}}{1.5 U_{MG} k_{qv}} \\ \delta_{VC} = \frac{Q_{mV} - Q_{mC}}{0.5(Q_{mV} + Q_{mC})} \approx \frac{X_{LC} - X_T}{1.5 k_{qv} U_{MG} + 0.5(X_{LC} + X_T)} \end{cases} \quad (25)$$

可见,无功功率差值主要取决于虚拟感抗、下垂系数以及当前的无功功率值。

由式(23)可知,可以根据式(25)自适应调节 VCM-VSC 空载电压值来改善功率分配精度。但由(14)(16)可知,该方法将减弱虚拟阻抗对 VCM-VSC 间无功分配精度的改善。

基于以上分析,本文提出 CCM-VSC 自适应空载电压补偿法,其无功控制方程为

$$Q_C = k_{qc} (U_C^{ref} - U_{comp} - U_g) = k_{qc} [U_C^{ref} - Q_{mC} X_{vrV} / (1.5 U_g) - U_g] \quad (26)$$

可见,该方法无需依据互联线来调整空载电压幅值。只需依据当前计算的无功功率值即可自适应调整空载电压补偿值。由式(24)(26)可得

$$Q_{mC} \approx \frac{k_{qc} (U_C^{ref} - U_{MG})}{1 + k_{qc} (X_{vrV} + X_{LC}) / (1.5 U_{MG})} \quad (27)$$

若预先设置 $U_V^{ref} = U_C^{ref}$ 和 $k_{qv} k_{qc} = 1$,则由式(18)(27)可得,无功分配误差为

$$\delta_{VC} \approx \frac{X_{LC} - X_{LV}}{1.5 k_{qv} U_{MG} + X_{vrV} + 0.5(X_{LV} + X_{LC})} \quad (28)$$

与式(25)相比,所提方法可以有效改善 VCM-VSC 和 CCM-VSC 间无功分配精度。

若两者需按照一定比例分配无功功率,如 $Q_{mV}:Q_{mC}=1:k_{qv}k_{qc}$,则补偿电压为

$$U_{comp} = \frac{Q_{mC} X_{vrV}}{1.5 k_{qv} k_{qc} U_g} \quad (29)$$

则补偿前分配误差为

$$\delta_{VC} = \frac{k_{qv} k_{qc} Q_{mV} - Q_{mC}}{0.5(k_{qv} k_{qc} Q_{mV} + Q_{mC})} \approx \frac{k_{qc} k_{qv} X_{LC} - X_T}{1.5 k_{qv} U_{MG} + 0.5(k_{qc} k_{qv} X_{LC} + X_T)} \quad (30)$$

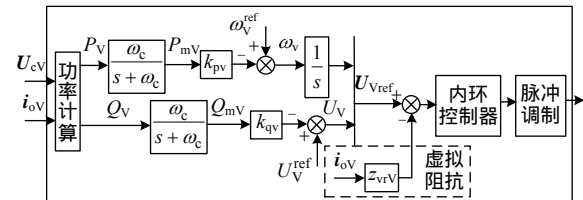
补偿后功率分配误差为

$$\delta_{VC} \approx \frac{k_{qc} k_{qv} X_{LC} - X_{LV}}{1.5 k_{qv} U_{MG} + X_{vrV} + 0.5(k_{qc} k_{qv} X_{LC} + X_{LV})} \quad (31)$$

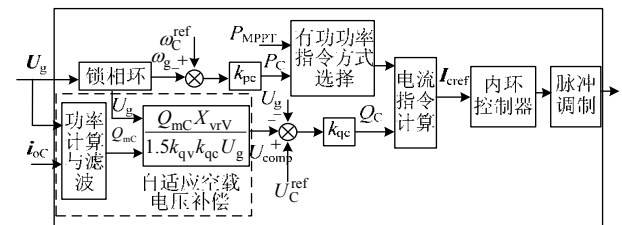
对比式(30)(31)可见,所提方法能较精确按照所需要求实现 VCM-VSC 和 CCM-VSC 无功分配。本文假设线路阻抗感性,在阻性线路中可类比分析。

3.4 控制实现

基于以上分析,本文采用的 VCM-VSC 和 CCM-VSC 控制框图如图 3 所示。



(a) VCM-VSC 控制框图



(b) CCM-VSC 控制框图

图 3 VCM-VSC 与 CCM-VSC 控制框图

Fig. 3 Control diagrams of VCM-VSC and CCM-VSC

4 实时硬件在环仿真实验

4.1 仿真参数

为验证所提控制策略的有效性,基于 dSPACE 1005 平台对其性能进行实时硬件在环仿真测试。该平台拓扑如图 2,由 4 台容量为 25 kVA 变流器及 1 台 90 kVA 可调模拟负荷组成。4 台变流器中,2 台变流器控制于 CCM:CCM-VSC1 和 CCM-VSC2,分别模拟光伏发电和风力发电系统;另外 2 台控制于 VCM:VCM-VSC1 和 VCM-VSC2。4 台变流器参数相同,如表 1 所示。

| 表 125 kVA 变流器主要参数 Tab.1 Main parameters of 25kVA converters | |
|--|-------------------|
| 参数 | 取值及单位 |
| 容量 | 25 kVA |
| 滤波电容 | 12μF |
| 滤波电感 | 2 mH |
| 变压器等效漏电感 | 0.378 mH |
| 开关频率 | 6 kHz |
| VCM-VSC1 并网线路阻抗 | 0.1Ω, 0.16 mH |
| VCM-VSC2 并网线路阻抗 | 0.1Ω, 0.32 mH |
| 角频率下垂曲线系数 | 0.000314rad/(s·W) |
| 角频率倒下垂系数 | 3183 (W·s)/rad |
| 电压下垂曲线系数 | 0.0031 V/var |
| 电压倒下垂系数 | 322.58 var/V |
| 虚拟阻抗 | 4mH |

4.2 VCM-VSC 与 CCM-VSC 间均载

实时硬件在环仿真结果和数据分别如图 4 和表 2(算例 4.2 部分)所示。初始阶段 S0：微电网系统运行于孤岛模式，VCM-VSC1 和 VCM-VSC2 采用下垂和虚拟阻抗控制，CCM-VSC1 和 CCM-VSC2 均运行最大功率点、单位功率因数模式下，其有功功率 P_{mC1} 和 P_{mC2} 均为 5 kW，无功功率 Q_{mC1} 和 Q_{mC2} 均为 0。微电网负荷为阻感负荷，其中电阻 R 为 9.65Ω，电感 L 为 46 mH，额定电压工况下对应有功负荷 P_L 为 15 kW，无功负荷 Q_L 为 10kvar。由于下垂控制特性，微电网电压幅值和角频率稍偏离额定值 U_N 和 ω_N ，负载有功功率为 12.6kW，无功功率为 8.4kvar。由图 4 和表 2 可见，虽然 VCM-VSC1 和 VCM-VSC2 并网线路阻抗略有差异，但通过虚拟阻抗可实现均载，两者的有功功率 P_{mV1} 和 P_{mV2} 均在 1.298 kW， Q_{mV1} 和 Q_{mV2} 分别为在 4.233 kvar 和 4.153 kvar。2 台 VCM-VSC 之间有功实现了精确的均分，无功分配误差 δ_{V12} 为

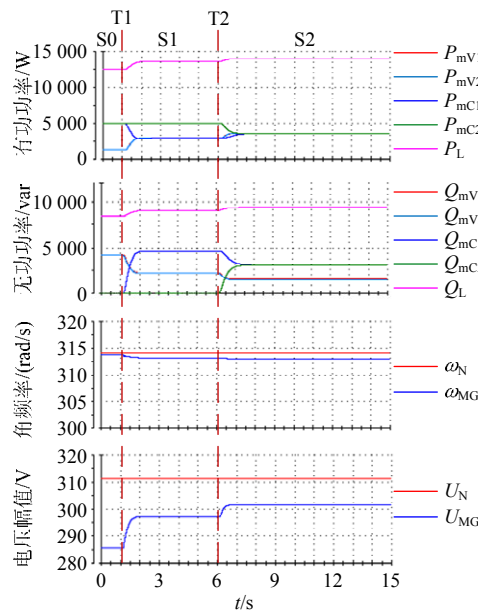


图 4 VCM-VSC 与 CCM-VSC 间均载

Fig. 4 Power-sharing between VCM-VSC and CCM-VSC

0.019，可见无功分配精度也较高。在该阶段，负荷无功全部由 VCM-VSC 提供。

S1 阶段：在 T1 时刻，将 CCM-VSC1 控制模式转为 ω - P 、 U - Q 倒下垂模式。在此假设其有功功率与无功功率可自由调配，且认为与 VCM-VSC 具有相同的有功与无功容量。由于 CCM-VSC1 对系统无功功率的支持作用，系统电压偏离额定值的差值减小。由图 4 和表 2 可见，CCM-VSC1 与 2 台 VCM-VSC 间实现了较好的有功功率均载，均稳定运行于 2.888kW。然而，由于等效线路阻抗差异的影响，CCM-VSC 与 VCM-VSC 并没有实现较好的无功均载，CCM-VSC1 与 2 台 VCM-VSC 无功分配误差 δ_{V1C1} 和 δ_{V2C1} 分别为-0.683 和 -0.705。

S2 阶段：在 T2 时刻，将 CCM-VSC2 转变为与 CCM-VSC1 同样的工作模式。系统电压偏离额定值的差值进一步减小。同时可见，由于稳态时，系统运行于同一频率，有功功率在 4 台变流器之间实现了较好的均载，均稳定运行于 3.514kW。无功功率在 2 台 CCM-VSC 之间实现了较好的均载，均稳定运行于 3.161kvar。但由于等效线路阻抗差异的影响，其并未与 VCM-VSC 实现均载， δ_{V1C1} 和 δ_{V2C1} 分别为-0.682 和-0.709。

4.3 功率分配精度改善

系统初始条件与 4.2 相同，实时硬件在环仿真结果如图 5 和表 2(算例 4.3 部分)所示，在本算例中，CCM-VSC 控制中加入自适应的空载电压补偿法控制。与 4.2 相比，无功功率在 VCM-VSC 与 CCM-VSC 之间实现较好的均载性能。由表 2 可见，在 S2 阶段， δ_{V1C1} 和 δ_{V2C1} 分别为-0.007 和-0.033。

4.4 根据无功储备按需分配

按照 VCM-VSC 有功额定为 10 kW，无功额定为 10 kvar，最大电压偏差为 10%额定电压，最大频率偏差为 $\pm 0.5\text{Hz}$ 设置下垂系数。CCM-VSC 按

表 2 实时硬在环仿真功率分配数据
Tab.2Power-sharing data in real time hardware-in-the-loop simulations

| 算例 | 阶段 | 有功功率/W | | | | 无功功率/var | | | | 无功分配误差/pu | | | | | |
|-----|----|-----------|-----------|----------|----------|-----------|-----------|----------|----------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|
| | | P_{mV1} | P_{mV2} | P_{C1} | P_{C2} | Q_{mV1} | Q_{mV2} | Q_{C1} | Q_{C2} | δ_{V12} | δ_{V1C1} | δ_{V1C2} | δ_{V2C1} | δ_{V2C2} | δ_{C12} |
| 4.2 | S0 | 1298 | 1298 | 5000 | 5000 | 4233 | 4153 | 0 | 0 | 0.019 | — | — | — | — | — |
| | S1 | 2888 | 2888 | 2888 | 5000 | 2262 | 2207 | 4608 | 0 | 0.025 | -0.683 | — | -0.705 | — | — |
| | S2 | 3514 | 3514 | 3514 | 3514 | 1553 | 1507 | 3161 | 3161 | 0.030 | -0.682 | -0.682 | -0.709 | -0.709 | — |
| 4.3 | S0 | 1298 | 1298 | 5000 | 5000 | 4233 | 4153 | 0 | 0 | 0.019 | — | — | — | — | — |
| | S1 | 2748 | 2748 | 2748 | 5000 | 2960 | 2894 | 2970 | 0 | 0.023 | -0.003 | — | -0.026 | — | — |
| | S2 | 3405 | 3405 | 3405 | 3405 | 2282 | 2224 | 2298 | 2298 | 0.026 | -0.007 | -0.007 | -0.033 | -0.033 | 0 |
| 4.4 | S0 | -701.5 | -701.6 | 5000 | 9000 | 4242 | 4173 | 0 | 0 | 0.016 | — | — | — | — | — |
| | S1 | -381.1 | -381.1 | 5000 | 9000 | 3113 | 3062 | 2649 | 0 | 0.017 | 0.018 | — | 0.001 | — | — |
| | S2 | -276.5 | -276.5 | 5000 | 9000 | 2747 | 2701 | 2337 | 1176 | 0.017 | 0.018 | 0.011 | 0.001 | -0.001 | -0.001 |

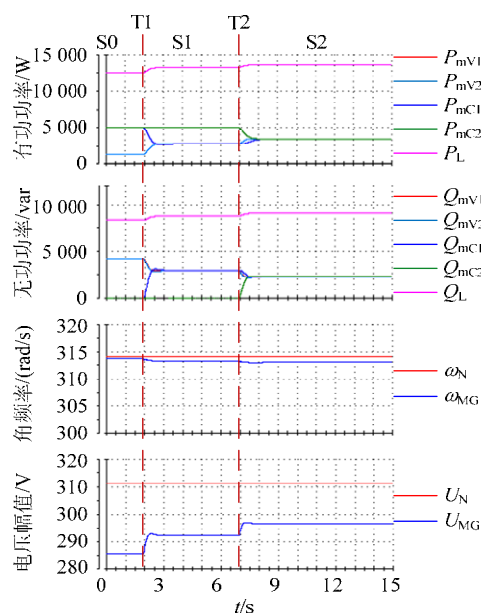


图5 VCM-VSC与CCM-VSC间功率分配精度改善

Fig. 5 Power-sharing improvement between VCM-VSC and CCM-VSC

照视在功率为 10kVA 计算。初始条件 S0：CCM-VSC1 和 CCM-VSC2 均运行最大功率点、单位功率因数模式下，其有功功率 P_{mC1} 和 P_{mC2} 分别为 5 kW 和 9 kW，无功功率 Q_{mC1} 和 Q_{mC2} 均为 0。实时硬件在环仿真结果如图 6 和表 2(算例 4.4 部分)所示。

S1 阶段：T1 时刻，启动 CCM-VSC1，按照无功储备量，3 台变流器按照 $Q_{mC1}:Q_{mV1}:Q_{mV2}=8.66:10:10$ 共同分担负荷无功 8.8kvar。因此， Q_{mC1} 、 Q_{mV1} 、 Q_{mV2} 无功功率将分别承担 2.6、3.1、3.1kvar。

由图 6 和表 2 可见， Q_{mC1} 、 Q_{mV1} 、 Q_{mV2} 分别为

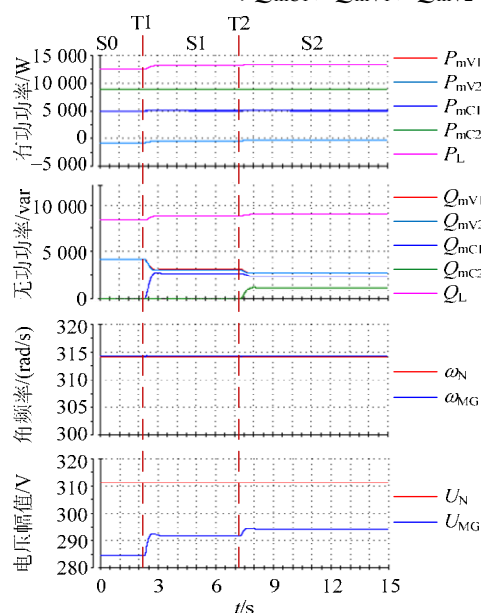


图6 按照无功储备分配无功功率

Fig. 6 Reactive power-sharing according to reactive power reserve

2.649、3.113、3.062kvar。 δ_{V12} 、 δ_{V1C1} 和 δ_{V2C1} 分别为 0.017、0.018 和 0.001。可见，按照所要求进行无功功率分配的精度较高。

S2 阶段：T2 时刻，启动 CCM-VSC2，此时 2 台 CCM-VSC 的无功储备分别为 8.66 和 6.6kvar，则 4 台变流器按照 $Q_{mC1}:Q_{mC2}:Q_{mV1}:Q_{mV2}=8.66:4.35:10:10$ 共同分担负荷无功 8.9kvar。因此， Q_{mC1} 、 Q_{mC2} 、 Q_{mV1} 、 Q_{mV2} 无功功率将分别承担 2.3、1.2、2.7、2.7kvar。由图 6 和表 2 可见， Q_{mC1} 、 Q_{mC2} 、 Q_{mV1} 、 Q_{mV2} 分别为 2.337、1.176、2.747、2.701kvar。由表 2 可见，无功功率的分配误差均在 0.02 以内，表明较高的无功功率分配精度。

5 结论

为了减小储能系统功率调节压力，实现潮流在系统内的合理分配，本文提出了一种分布式多变流器型微电网无互联线潮流控制。针对 VCM-VSC 和 CCM-VSC 控制特点，提出了适用于 CCM-VSC 的倒下垂控制来实现 CCM-VSC 间的功率分配，并通过合理设置 CCM-VSC 倒下垂系数与 VCM-VSC 下垂系数实现潮流在基于这 2 种接口变流器的 DR 间的合理分配。同时，为了改善 VCM-VSC 和 CCM-VSC 间功率分配精度，提出虚拟阻抗与自适应空载电压结合法。最后，通过实时硬件在环仿真平台验证了所提控制策略的正确性与可行性。结果表明，功率能够按照需求在 VCM-VSC 和 CCM-VSC 间合理分配，减小了 VCM-VSC 功率调控压力，且分配精度较高。

本文采用的虚拟阻抗与自适应空载电压结合法暂仅考虑线路阻抗或虚拟阻抗设置为感性工况，其他工况可类比分析。针对此，本文将在今后工作中分析多种线路阻抗和虚拟阻抗设置时的功率分配情况，以更好满足实际工程应用的多种需求。

参考文献

- [1] 黄伟, 孙昶辉, 吴子平, 等. 含分布式发电系统的微电网技术研究综述[J]. 电网技术, 2009, 33(9): 14-18.
Huang Wei, Sun Changhui, Wu Ziping, et al. A review on microgrid technology containing distributed generation system[J]. Power System Technology, 2009, 33(9): 14-18(in Chinese).
- [2] 袁越, 李振杰, 冯宇, 等. 中国发展微网的目的方向前景[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 59-63.
Yuan Yue, Li Zhenjie, Feng Yu, et al. Development purposes, orientations and prospects of microgrid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 59-63(in Chinese).
- [3] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
Wang Chengshan, Li Peng. Development and challenges of

- distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23(in Chinese).
- [4] IEEE Std 1547.4-2011 IEEE guide for design, operation, and integration of distributed resource island systems with electric power systems[S]. New York, USA: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2011.
- [5] 张丽, 徐玉琴, 王增平, 等. 包含同步发电机及电压源逆变器接口的微网控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 170-176.
Zhang Li, Xu Yuqin, Wang Zengping, et al. Control scheme of microgrid fed by synchronous generator and voltage source inverter[J]. Power System Technology, 2011, 35(3): 170-176(in Chinese).
- [6] 鲍薇, 胡学浩, 何国庆, 等. 分布式电源并网标准研究[J]. 电网技术, 2012, 36(11): 46-52.
Bao Wei, Hu Xuehao, He Guoqing, et al. Study on standard for grid-integration of distributed resources[J]. Power System Technology, 2012, 36(11): 46-52(in Chinese).
- [7] Green T C, Prodanovic M. Control of inverter-based micro-grids[J]. Electric Power System Research, 2007, 77(9): 1204-1213.
- [8] Rocabert J, Luna A, Blaabjerg F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [9] 马添翼, 金新民, 黄杏. 含多变流器的微电网建模与稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 12-17.
Ma Tianyi, Jin Xinmin, Huang Xing. Modeling and stability analysis of microgrid with multiple converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 12-17(in Chinese).
- [10] 牛铭, 黄伟, 郭佳欢, 等. 微网并网时的经济运行研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 38-42.
Niu Ming, Huang Wei, Guo Jiahuan, et al. Research on economic operation of grid-connected microgrid[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 38-42(in Chinese).
- [11] 国家电网公司. Q/GDW 617—2011 光伏电站接入电网技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [12] 国家电网公司. Q/GDW 480—2010 分布式电源接入电网技术规定[S].
- [13] Sefa I, Altin N, Ozdemir S. An implementation of grid interactive inverter with reactive power support capability for renewable energy sources[C]//Proceeding of Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG). Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2011: 1-6.
- [14] Braun M, Stetz T, Reimann T, et al. Optimal reactive power supply in distribution networks—technological and economic assessment for PV systems[C]//European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition. Hamburg, Germany: European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 2009: 3872-3881.
- [15] Geibel D. Multifunctional photovoltaic inverter systems—energy management and improvement of power quality and reliability in industrial environments[C]//Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, CA: IEEE, 2009: 3881-3888.
- [16] Craciun BI, Man E A, Muresan V A, et al. Improved voltage regulation strategies by PV inverters in LV rural networks[C]//Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). Aalborg: IEEE, 2012: 775-781.
- [17] 周林, 晁阳, 廖波, 等. 低压网络中并网光伏逆变器调压策略[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2427-2432.
Zhou Lin, Chao Yang, Liao Bo, et al. A voltage regulation strategy by grid-connected pv inverters in low-voltage networks[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2427-2432 (in Chinese).
- [18] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
Wang Chengshan, Xiao Zhaoxia, Wang Shouxian. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107(in Chinese).
- [19] 高春风, 杨仁刚, 王江波, 等. 基于虚拟频率的微电网下垂控制策略设计[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3331-3335.
Gao Chunfeng, Yang Rengang, Wang Jiangbo, et al. Droop control strategy design of microgrid based on virtual frequency[J]. Power System Technology, 2013, 37(12): 3331-3335 (in Chinese).
- [20] 王旭斌, 李鹏. 微网孤岛运行模式下的新型负荷分配控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(1): 181-187.
Wang Xubin, Li Peng. A novel load distribution and control strategy for microgrid in autonomous operation mode[J]. Power System Technology, 2014, 38(1): 181-187 (in Chinese).
- [21] Vasquez J C, Guerrero J M, Savaghebi M, et al. Modeling, analysis, and design of stationary reference frame droop controlled parallel three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.
- [22] Guerrero J M, Vasquez J C, Matas J, et al. Hierarchical control of droop-controlled DC and AC microgrids—a general approach towards standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.



唐芬

收稿日期: 2014-03-19。

作者简介:

唐芬(1984), 女, 博士后, 主要研究方向为电力电子与电力传动、新能源发电、微电网系统控制等, E-mail: fent@bjtu.edu.cn;

吴丹(1986), 女, 博士研究生, 主要研究方向为微电网系统控制;

周啸(1986), 男, 博士研究生, 主要研究方向为新能源发电技术。

(责任编辑 徐梅)