

DOI: 10.7667/PSPC180301

基于扰动观测器的孤立交直流混合微电网双向 AC/DC 换流器电压波动控制策略研究

蔡杰¹, 刘子文², 苗世洪², 晁凯云², 张籍¹, 黄大玮¹

(1. 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院, 湖北 武汉 430062;

2. 华中科技大学电气与电子工程学院强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 针对孤立交直流混合微电网中双向 AC/DC 换流器在外界扰动下出现电压波动的问题, 设计了一种应用于双向 AC/DC 换流器的母线电压扰动观测器, 以实现在分布式电源出力和负荷功率变化等外界扰动情况下对系统扰动量的快速跟踪, 且无需增加额外的电压或电流传感器, 保证了交直流混合微电网内分布式电源和负荷的即插即用功能。进一步地提出了基于扰动观测器的孤立交直流混合微电网双向 AC/DC 换流器电压波动控制策略, 以有效抑制暂态电压波动和冲击, 提高了孤立混合微电网在不同扰动下的动态响应性能和鲁棒稳定性。在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了孤立交直流混合微电网仿真模型, 通过在不同暂态过程下的仿真测试验证了所提方法的有效性和正确性。

关键词: 交直流混合微电网; 双向 AC/DC 换流器; 电压波动; 扰动观测器; 鲁棒稳定

Research on voltage fluctuation control strategy of the bidirectional AC/DC converter in islanding AC and DC hybrid microgrid based on disturbance observer

CAI Jie¹, LIU Ziwen², MIAO Shihong², CHAO Kaiyun², ZHANG Ji¹, HUANG Dawei¹

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Limited Economic Research Institute, Wuhan 430062, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In view of the voltage fluctuation problem of the bidirectional AC/DC converter in islanding AC and DC hybrid microgrid during external disturbance, a disturbance observer of the bus voltage of the bidirectional AC/DC converter is designed in this paper. With this observer, the system disturbance under the circumstance of external impact such as the abrupt change of distributed generation output and load power can be tracked quickly without additional voltage or current sensors, which ensures the plug and play function of the distributed generation and load in the hybrid microgrid. A voltage fluctuation control strategy of the bidirectional AC/DC converter based on the disturbance observer is proposed further to effectively suppress transient voltage fluctuation and impact, which can improve the dynamic response performance and robust stability of the islanding hybrid microgrid under different external disturbance. The simulation model of the islanding AC and DC hybrid microgrid is established in PSCAD/EMTDC to verify the validity and effectiveness of the proposed method with several transient process cases.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0903601), National Natural Science Foundation of China (No. 51777088), and Science and Technology Project of State Grid Hubei Electric Power Company Limited Economic Research Institute (No. SGHBJY00PSWT1700080).

Key words: AC and DC hybrid microgrid; bidirectional AC/DC converter; voltage fluctuation; disturbance observer; robust stability

0 引言

随着能源和环境问题的日益突出, 发展清洁可

再生能源和分布式发电技术成为了国内外学者的普遍共识^[1]。由于分布式发电具有不可控和随机波动的特性, 其高渗透率对电力系统的稳定性有负面影响^[2-3]。因此, 为了协调大电网与分布式发电间的矛盾, 充分挖掘分布式发电为电网和用户带来的价值和效益, 学者们提出并不断发展了微电网的概念^[4-6]。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0903601); 国家自然科学基金项目资助(51777088); 国网湖北省电力有限公司经济技术研究院科技项目资助(SGHBJY00PSWT1700080)

微电网是一种整合了分布式电源、储能装置、负荷和控制系统的微型电网, 既可以与大电网互联, 也可以独立向负荷供电。目前, 国内外研究的微电网结构有纯交流母线型、纯直流母线型和交直流混合母线型^[7]。交直流混合微电网同时含有交流母线与直流母线, 既可以直接向交流负荷供电, 也可以直接向直流负荷供电, 可以同时发挥直流微电网和交流微电网的优势, 因此交直流混合微电网的协调稳定控制策略就变得不可或缺^[8-11]。

当微电网处于联网模式时, 其交流母线电压与频率由大电网支撑, 因而微电网抵御外界扰动的能力较强。孤岛运行时, 交流母线电压与频率由双向 AC/DC 换流器进行控制, 以确保线路电压的稳定。此时, 由于分布式电源出力的不确定性以及微电网系统的低惯量特点, 其母线电压极易受负荷功率波动、分布式电源出力突变等因素的影响。通过对双向 AC/DC 换流器进行合理地控制来维持孤岛混合微电网母线电压的稳定成为关键问题之一。文献[12]针对孤岛微电网非线性负载产生的谐波电流扰动和逆变器滤波参数摄动, 提出了一种自适应滑模全局鲁棒电压控制器, 使得控制系统具备全局鲁棒性, 但响应效果对控制参数较为敏感; 文献[13]针对直流配电网的功率控制和电压波动问题进行了研究, 但未提出能提高电压动态响应特性的改进控制策略; 文献[14-15]提出了基于扰动前馈控制的电压波动抑制方法, 将外界功率变化量看作系统的固有扰动并进行抑制, 但需要增加额外的电流传感器; 还有一些学者提出了多变量 H ∞ 优化控制^[16]、自抗扰控制^[17]和强化学习非线性控制^[18]等先进控制策略, 但存在过于复杂、实时性差等特点。

本文提出了一种双向 AC/DC 换流器电压扰动观测器, 以对分布式电源出力和负荷功率变化等外界扰动量进行快速跟踪, 且无需增加额外的电压或电流传感器; 进一步地提出了基于扰动观测器的孤立交直流混合微电网双向 AC/DC 换流器电压波动控制策略, 提高了不同扰动下孤立微网系统的动态响应性能和鲁棒稳定性; 最后在 PSCAD/EMTDC 平台上搭建了孤立交直流混合微电网仿真模型, 验证了所提方法的有效性和正确性。

1 交直流混合微电网典型结构

交直流混合微电网典型示意图如图 1 所示, 包括交流母线、直流母线、双向 AC/DC 换流器、分布式电源及交直流负荷。

交直流混合微电网中双向 AC/DC 换流器对系统的稳定运行和功率的协调分配有着重要作用, 根

据交流微网和直流微网的功率平衡状况, 既可以工作在整流状态也可以工作在逆变状态。混合微电网在并网运行时, 通过大电网公共接入点(PCC)与微电网进行功率交换, 孤岛运行时, 可通过双向变流器使功率在交直流混合微电网间灵活分配, 从而实现整个混合微电网功率的自主平衡。

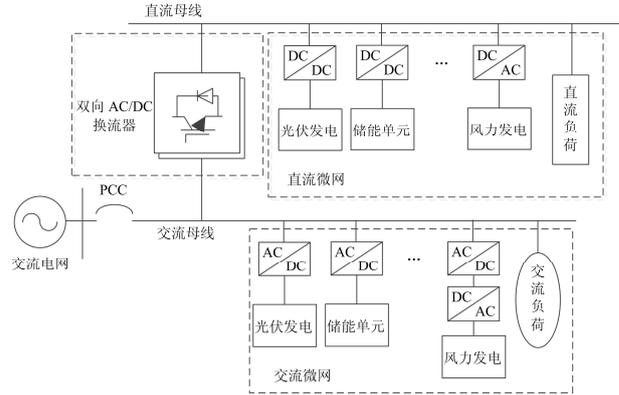


图 1 交直流混合微电网示意图

Fig. 1 A hybrid AC/DC microgrid system

2 交直流混合微电网双向 AC/DC 变换器电压波动抑制策略

孤立交直流混合微电网中双向 AC/DC 换流器拓扑结构见图 2。

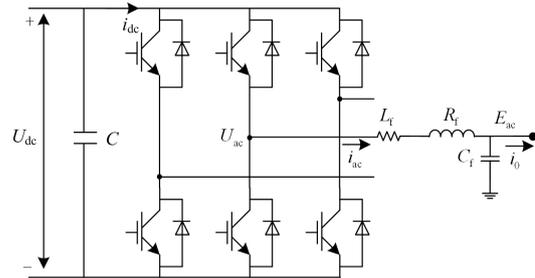


图 2 双向 AC/DC 换流器拓扑结构

Fig. 2 Topological structure of the bidirectional AC/DC converter

由图 2 可知, 双向 AC/DC 换流器交流电压动态方程可表示为

$$\begin{cases} U_{ac} = E_{ac} + R_f i_{ac} + L_f \frac{di_{ac}}{dt} \\ i_0 = i_{ac} - C_f \frac{dE_{ac}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

图 2 中, U_{ac} 和 i_{ac} 分别是换流器交流侧电压电流, E_{ac} 和 i_0 分别是交流母线出口电压和输出电流, U_{dc} 和 i_{dc} 分别是换流器直流侧电压电流, R_f 、 L_f 和 C_f 分别是 RLC 滤波器的等效电阻、电感和电容, C

是直流侧电容。

根据文献[19]所述功率控制策略可得双向AC/DC变换器的外环功率参考信号,进而通过功率PI(Proportional Integral)环和电流PI环的双环控制可以得到双向AC/DC变换器的参考电压信号。然而,在交直流混合微电网中,由于DG功率波动、系统负荷波动、系统参数变化以及检测技术限制等因素的影响,通常难以获得控制对象的精确模型,这些未建模项将导致双向AC/DC变换器的输出电压产生波动,尤其当混合微电网处于孤立运行模式时,由于缺少上级电网的支撑,微电网对外界扰动的鲁棒性更差。为此,本文提出了基于扰动观测的电压波动控制策略,以最大化双向AC/DC变换器的扰动抑制性能,提高交直流混合微电网在孤岛运行状态下的鲁棒稳定性。

考虑到双向AC/DC变换器的参数不确定性,可得图2中变换器的电压动态方程为

$$\frac{d^2 E_{ac}(t)}{dt^2} = a \frac{dE_{ac}(t)}{dt} + g_c E_{ac}(t) - g_c U_{ac}(t) + w(t) \quad (2)$$

$$\text{式中: } a = -\frac{R_f}{L_f}; \quad g_c = -\frac{1}{L_f C_f}; \quad w(t) = g_c d(t) + \Delta\Gamma(t),$$

$d(t) = L_f \frac{di_0}{dt} + R_f i_0$, 由参数不确定引起的电压方程偏差 $\Delta\Gamma(t)$ 为

$$\Delta\Gamma(t) = \Delta a \frac{dE_{ac}(t)}{dt} + \Delta g_c E_{ac}(t) - \Delta g_c U_{ac}(t) \quad (3)$$

在孤立混合微电网中,负荷功率的突变,或者DG出力的变化,都会引起双向AC/DC换流器输出电流 i_0 的变化,而由于换流器电压响应落后于输出电流 i_0 的变化,因此该暂态过程将进一步引起交流母线电压的暂态波动。特别是在大功率扰动的情形下,传统的PI控制器由于缺乏理想的动态响应特性而无法有效抑制交流母线电压的波动。因此,在双向AC/DC变换器电压动态方程(2)中,与输出电流 i_0 相关的扰动项 $d(t)$ 可以看作是外界功率变化对换流器交流母线电压的固有扰动项。同时考虑到系统参数的误差和检测技术的限制,很难得到控制对象的精确模型,这些未建模误差项同样也会降低双向AC/DC变换器的电压动态响应特性,因此在动态方程(2)中,与系统参数误差相关的扰动项 $\Delta\Gamma(t)$ 可以看作是换流器交流母线电压的内在不确定性扰动项。综上所述,在换流器电压动态方程(2)中, $w(t)$ 综合表示系统扰动对电压动态响应的作用,该扰动包括DG出力、负荷功率变化及运行方式切换等引起的外界功率波动,体现在扰动分量 $d(t)$ 中;与此同

时, $w(t)$ 还包括系统参数不确定性的偏差对换流器电压动态响应的影响,该部分的影响体现在扰动分量 $\Delta\Gamma(t)$ 中。为了补偿扰动项 $w(t)$ 对换流器交流母线电压的不利影响,本文提出了一种改进型扰动观测器来跟踪观测扰动项 $w(t)$,并依据该扰动观测结果提出了一种基于扰动抑制的双向AC/DC换流器电压鲁棒控制策略,以提高孤立交直流混合微电网在不同扰动下的动态响应性能和鲁棒性。

首先定义状态变量 $\mathbf{x} = [x_1 \quad x_2]^T = [E_{ac} \quad \dot{E}_{ac}]^T$, 则式(2)可写为标准形式。

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}) + \mathbf{g}_w w(t) \quad (4)$$

式中

$$\begin{cases} \mathbf{f}(\mathbf{x}) = [f_1 \quad f_2]^T = [x_2 \quad g_c x_1 + a x_2 - g_c U_{ac}]^T \\ \mathbf{g}_w = [0 \quad 1]^T \end{cases}$$

由于输出电流扰动 $d(t)$ 由一系列正弦电流信号和余弦电流信号组成,若假设输出电流 i_0 可以表示为 $i_0(t) = I_0 \sin \omega t$ (其中 I_0 为输出电流幅值,为未知量),则系统扰动 $w(t)$ 可表示为以下扩展方程。

$$\begin{cases} \dot{\boldsymbol{\xi}}(t) = \mathbf{A}\boldsymbol{\xi}(t) \\ w(t) = \mathbf{C}\boldsymbol{\xi}(t) \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{式中: } \boldsymbol{\xi} = \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_0 \sin \omega t \\ I_0 \cos \omega t \\ \Delta\Gamma \end{bmatrix}; \quad \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & \omega & 0 \\ -\omega & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$\mathbf{C} = [Rg_c \quad \omega Lg_c \quad 1]$; 且系统偏差量 $\Delta\Gamma(t)$ 近似看成直流量,即有 $\Delta\dot{\Gamma}(t) = 0 (t > 0)$ 。值得提出的是,偏差量 $\Delta\Gamma(t)$ 理论上可以看成具有高阶导数的非直流量,但在这种情形下设计的观测器具有复杂的结构而不便工程实现,并且其高阶噪声的影响将会更加明显,因此本文中偏差量 $\Delta\Gamma(t)$ 采用一阶直流量的形式。

本文采用一种扰动观测器来估计式(2)中的扰动,该扰动观测器为文献[20]所提观测器在正弦扰动下的扩展,可定义为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}} = (\mathbf{A} - \mathbf{k}(x)\mathbf{C})\mathbf{p} + \mathbf{A}\mathbf{q}(x) - \mathbf{k}(x)(\mathbf{C}\mathbf{q}(x) + f_2) \\ \hat{\boldsymbol{\xi}} = \mathbf{p} + \mathbf{q}(x) \\ \hat{w} = \mathbf{C}\hat{\boldsymbol{\xi}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: \hat{w} 即是针对扰动项 w 的观测值; $\hat{\boldsymbol{\xi}}$ 和 \mathbf{p} 是所设计观测器的中间状态变量矩阵; $\mathbf{q}(x)$ 是所需要的观测函数,定义为

$$\mathbf{q}(x) = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T \cdot x_1 \quad (7)$$

则观测增益 $\mathbf{k}(x)$ 可以表示为

$$\mathbf{k}(x) = \frac{\partial \mathbf{q}(x)}{\partial \mathbf{x}_1} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^T \quad (8)$$

若定义观测误差 \mathbf{e}_w 为

$$\begin{cases} \mathbf{e}_w = [e_{w1} \quad e_{w2} \quad e_{w3}]^T \\ e_{wj} = \xi_j - \hat{\xi}_j \quad (j=1,2,3) \end{cases} \quad (9)$$

则观测误差的动态方程可以表示为

$$\frac{d\mathbf{e}_w(t)}{dt} = (\mathbf{A} - \mathbf{k}(x)\mathbf{C})\mathbf{e}_w(t) \quad (10)$$

若选择观测增益 $\mathbf{k}(x)$ 以确保矩阵 $(\mathbf{A} - \mathbf{k}(t)\mathbf{C})$ 满足 Hurwitz 条件^[20], 则误差方程(10)满足渐近稳定的条件, 即观测值 \hat{w} 可以以指数形式收敛到实际值。为了提高观测器的收敛速度, 观测增益 k_1 、 k_2 和 k_3 的绝对值应尽可能取较大的值, 但同时也应注意, 如果 k_1 、 k_2 和 k_3 的绝对值取得过大, 可能导致饱和效应、噪声加剧等, 给观测器的实现带来困难, 因此观测增益的选取只需保证观测器的响应速度大于反馈控制系统的响应速度。

为了减小系统扰动量 $w(t)$ 对换流器交流母线电压的影响, 本文在双向 AC/DC 换流器的参考电压信号上附加了基于扰动抑制的电压鲁棒控制信号, 以提高微电网在不同扰动下的动态响应性能, 如图3所示。

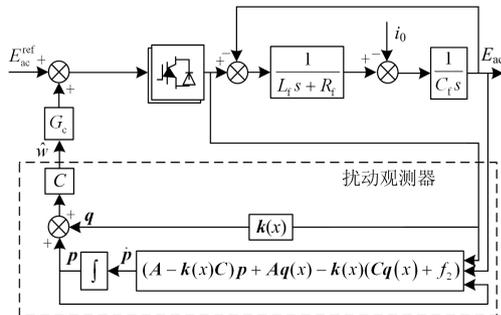


图3 基于扰动抑制的双向 AC/DC 换流器电压鲁棒控制方案
Fig. 3 Robust voltage control of bi-directional AC/DC converter scheme based on disturbance suppression

由图3可知, 所提出的电压鲁棒控制策略为双向 AC/DC 换流器提供了具有扰动抑制能力的参考电压信号, 据此可得换流器交流母线电压的响应函数为

$$E_{ac}(s) = \frac{-g_c}{s^2 - as - g_c} U_{ac}(s) - \frac{g_c G_c}{s^2 - as - g_c} \hat{w}(s) + \frac{1}{s^2 - as - g_c} w(s) \quad (11)$$

由式(11)可以看出, 合适的干扰抑制环节 G_c 可以消除扰动 $w(s)$ 对母线电压 $E_{ac}(s)$ 的扰动, 增强了系统在 DG 出力变化、负荷功率波动、双向 AC/DC 换流器传输功率变化以及系统参数不确定等情形下系统的动态响应, 并有效抑制系统的外界扰动。根据式(11), 干扰抑制环节 G_c 应满足 $G_c = 1/g_c$ 。在实际应用中, 只需在双向 AC/DC 换流器的控制环节中增加本文提出的扰动观测器与抑制环节, 无需增加额外传感器或与其他 DG 的通信, 因此不会影响交直流混合微电网中 DG 的即插即用功能。

3 算例分析

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 1 所示的处于孤岛运行的交直流混合微电网仿真模型, 该交直流混合微电网的交流母线额定频率和电压分别为 50 Hz 和 380 V, 直流母线额定电压为 700 V。其中, 交流微网含有两个相同的 DG 微电源, 每个 DG 的额定有功功率和无功功率均为 40 kW 和 10 kvar; 直流微电网也含有两个相同的 DG 微电源, 相对应的每个 DG 的额定功率均为 40 kW。双向 AC/DC 换流器的滤波电感和电容分别为 0.005 H 和 10 μ F。微网系统中各 DG 单元均采用相应的下垂控制策略, 其控制参数和双向 AC/DC 换流器的控制参数如表 1 所示。将本文提出的电压波动改进控制与传统控制进行对比, 以验证所提控制策略的有效性。

表 1 控制系统参数表

Table 1 System control parameters		
DG 下垂控制参数		
有功-频率	无功-电压	有功-直流电压
下垂系数	下垂系数	下垂系数
0.02	0.001	0.0005
双向 AC/DC 换流器电压波动控制增益参数		
观测增益 k_1	观测增益 k_2	观测增益 k_3
-1e-5	80	50

3.1 仿真算例1

在该算例中, 交流微网中初始有功负荷为 40 kW, 无功负荷为 30 kvar, 直流微网初始负荷功率为 80 kW。4 s 时负荷功率发生变化, 交流微网中有功负荷增加 20 kW, 直流微网负荷增加 40 kW。系统在本文提出的电压波动控制策略和传统 PI 控制策略下的响应结果如图 8 所示。

由仿真结果可知, 4 s 前交流和直流微网中的 DG 单元发出 60 kW 有功功率, 即每个 DG 发出 30 kW, 双向 AC/DC 换流器从直流到交流微网传送 20 kW 有功功率。4 s 后交流微网和直流微网的有功负荷分别增加到 60 kW 和 120 kW, 因此交流和直

流 DG 各发出 90 kW 有功功率(即每个 DG 发出 45 kW), 同时双向 AC/DC 换流器向直流微网传送 30 kW 有功功率。由于交流微网中无功负荷为 30 kvar, 因此各交流 DG 发出 10 kvar 的额定无功功率, 双向 AC/DC 换流器向交流微网传送 10 kvar 以满足微网无功功率的平衡, 4 s 后设置双向 AC/DC 换流器传输的无功功率为 0 以减轻换流器的负担, 因此每个交流 DG 将发出 15 kvar 的无功功率。整个微电网的功率变化过程如图 4(a)、图 4(b)所示。

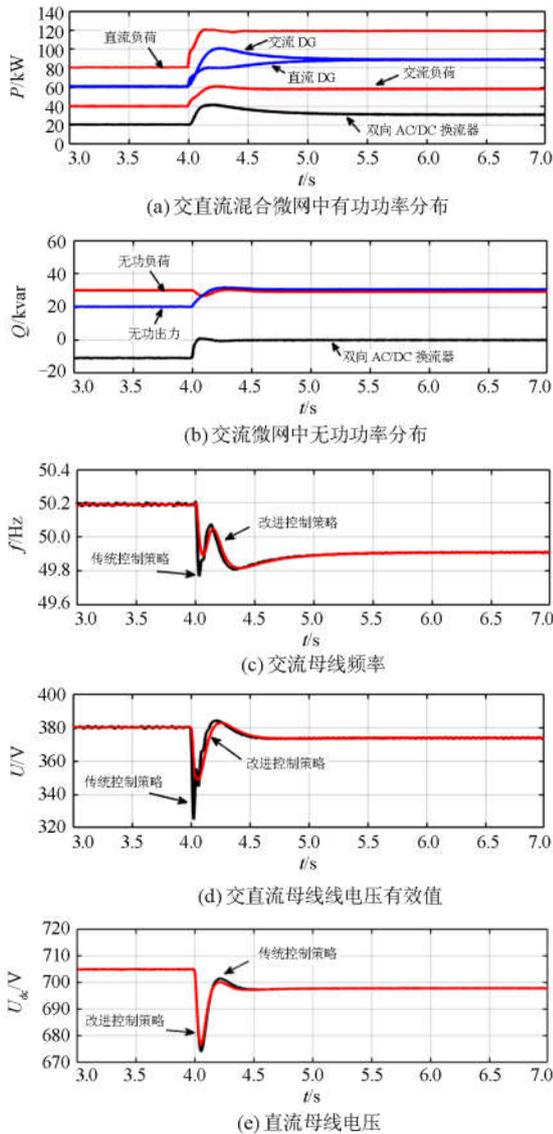


图 4 算例 1 的仿真结果

Fig. 4 Simulation results of case 1

从仿真对比结果可以看出, 系统负荷增加后, 交流母线频率和电压发生突然下降后逐渐保持稳定, 双向AC/DC传输的功率也产生较大的波动。基于扰动观测器的电压波动改进控制直接作用于双向AC/DC换流器, 从而可以直接控制换流器的有功功

率和无功功率, 进而改善外界扰动下交流和直流母线的动态响应特性。由图4(c)、4(d)、4(e)可知, 在基于扰动观测器的改进控制下, 双向AC/DC换流器的母线频率和电压暂态波动幅度明显小于传统的内环PI控制, 因此其暂态性能得到了明显提升, 从而减小了外部波动对换流器的影响。

3.2 仿真算例2

为进一步体现本文所提电压波动改进控制的优越性, 本算例以 DG 切出作为扰动源。具体扰动设置: 交流微网中初始有功负荷为 40 kW, 无功负荷为 20 kvar, 直流微网初始有功负荷为 120 kW。4 s 之后, 直流微网的一个 DG 单元因故障退出运行。在本文所提电压波动改进控制与传统 PI 控制下的系统响应对比结果如图 5 所示。

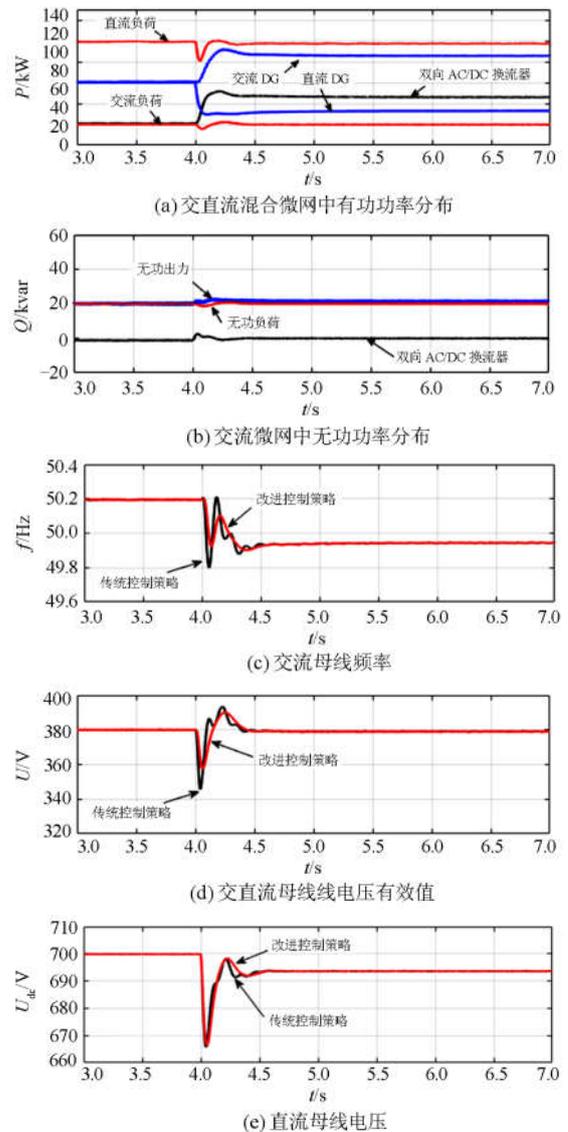


图 5 算例 2 的仿真结果

Fig. 5 Simulation results of case 2

从仿真结果可以看出, 在 4 s 之前, 交流和直流微网中的 DG 单元发出 80 kW 有功功率, 双向 AC/DC 换流器从直流到交流微网传送 40 kW 有功功率。4 s 之后由于直流微网的一个 DG 单元退出运行, 因此交流微网中的 DG 发出 106 kW 有功功率, 直流微网中剩下的 DG 发出 53 kW 功率, 同时双向 AC/DC 换流器将向直流微网传送 66 kW 有功功率。交流微网中的 DG 发出 20 kvar 额定无功功率以满足无功功率平衡。整个微电网的功率变化过程由图 5(a)、5(b)所示。

由图 5 仿真对比结果可知, 由于在双向 AC/DC 换流器的参考电压信号上附加了基于扰动抑制的电压鲁棒控制信号, 双向 AC/DC 换流器的母线电压和频率经过短暂的暂态过程之后恢复至稳态值, 其超调量和波动程度均明显小于传统 PI 控制。因此, 相比于传统 PI 控制, 本文提出的电压波动改进控制策略可以明显提高系统的鲁棒稳定性。

4 结论

本文针对孤立交直流混合微电网双向 AC/DC 换流器电压波动问题, 提出了一种电压扰动观测器, 以实现在分布式电源出力和负荷功率变化等外界扰动情况下对系统扰动量的快速跟踪, 保证了交直流混合微电网内分布式电源和负荷的即插即用功能; 进一步提出了基于扰动观测器的双向 AC/DC 换流器电压波动控制策略, 以有效抑制各种暂态工况对母线电压造成的冲击, 显著提高电压的动态响应性能和鲁棒稳定性。最后通过在 PSCAD/EMTDC 中搭建孤立交直流混合微电网仿真模型, 验证了该控制策略的正确性和有效性。

参考文献

- [1] LI H, ESEYE A T, ZHANG J, et al. Optimal energy management for industrial microgrids with high-penetration renewables[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 122-135. DOI: 10.1186/s41601-017-0040-6.
- [2] 博伦·马斯 H J, 哈桑·范安. 分布式发电接入电力系统[M]. 王政, 译. 北京: 机械工业出版社, 2015.
- [3] 张曦, 张宁, 龙飞, 等. 分布式电源接入配网对其静态电压稳定性影响多角度研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(6): 120-125.
ZHANG Xi, ZHANG Ning, LONG Fei, et al. Research of the impacts on static voltage stability of distribution networks with distributed generation from different aspects[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(6): 120-125.
- [4] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 37-45.
MI Yang, WU Yanwei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 37-45.
- [5] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 2-17.
- [6] GUO W, MU L. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [7] 周稳, 戴瑜兴, 毕大强, 等. 交直流混合微电网协同控制策略[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(10): 51-57.
ZHOU Wen, DAI Yuxing, BI Daqiang, et al. Coordinative control strategy for hybrid AC-DC microgrid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(10): 51-57.
- [8] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(4): 35-42.
LU Xiaonan, SUN Kai, GUERRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(4): 35-42.
- [9] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的新控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2013, 41(14): 13-18.
TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. One novel control strategy of the AC/DC bi-directional power converter in micro-grid[J]. *Power System Protection and Control*, 2013, 41(14): 13-18.
- [10] 毕大强, 周稳, 戴瑜兴, 等. 交直流混合微电网中储能变流器无缝切换策略[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(10): 84-89.
BI Daqiang, ZHOU Wen, DAI Yuxing, et al. Control strategies of seamless switching for energy storage converter in hybrid AC/DC microgrid[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(10): 84-89.
- [11] 祝钧, 李瑞生, 毋炳鑫, 等. 交直流混合微电网接口变流器虚拟同步发电机控制方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(11): 28-34.
ZHU Jun, LI Ruisheng, WU Bingxin, et al. Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids[J]. *Power System*

- Protection and Control, 2017, 45(11): 28-34.
- [12] 陈智勇, 罗安, 陈燕东, 等. 逆变器并联的自适应滑模全局鲁棒电压控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3272-3282.
CHEN Zhiyong, LUO An, CHEN Yandong, et al. Adaptive sliding-mode global robustness voltage control for islanded paralleled inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3272-3282.
- [13] 蒋智化, 刘连光, 刘自发, 等. 直流配电网功率控制策略与电压波动研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 919-926.
JIANG Zhihua, LIU Lianguang, LIU Zifa, et al. Research on power flow control and the voltage fluctuation characteristics of DC distribution networks based on different control strategies[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 919-926.
- [14] SATO A, NOGUCHI T. Voltage-source PWM rectifier-inverter based on direct power control and its operation characteristics[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(5): 1559-1567.
- [15] 王成山, 李霞林, 郭力. 基于功率平衡及时滞补偿相结合的双级式变流器协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 109-117.
WANG Chengshan, LI Xialin, GUO Li. Coordinated control of two-stage power converters based on power balancing and time-delay compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 109-117.
- [16] HOSSAIN M J, POTA H R, MAHMUD M A, et al. Robust control for power sharing in microgrids with low-inertia wind and PV generators[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 6(3): 1067-1077.
- [17] YIN Z, DU C, LIU J, et al. Research on auto-disturbance-rejection control of induction motors based on ant colony optimization algorithm[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(4): 3077-3094.
- [18] WANG D, HE H, MU C, et al. Intelligent critic control with disturbance attenuation for affine dynamics including an application to a microgrid system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4935-4944.
- [19] LOH P C, LI D, CHAI Y K, et al. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [20] KIM W, SHIN D, WON D, et al. Disturbance observer based position tracking controller in the presence of biased sinusoidal disturbance for electrohydraulic actuators[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(6): 2290-2298.

收稿日期: 2018-03-20; 修回日期: 2018-05-20

作者简介:

蔡杰(1985—), 男, 高级工程师, 研究方向为电网规划设计; E-mail: dtscj@163.com

刘子文(1991—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为交直流电力系统运行与控制; E-mail: jshalzw@163.com

苗世洪(1963—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: shmiao@hust.edu.cn

(编辑 许威)