

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190735

交直流混合微电网虚拟 APF 的研究

郑征, 金建新, 陶海军, 卢迪, 李纪伟

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454003)

摘要: 针对各种非线性负荷接入混合微电网导致交流母线电能质量恶化、交直流混合微电网电能需要双向流动的问题, 提出一种虚拟 APF 拓扑结构及其控制策略。通过采用瞬时功率理论, 设计了恒功率控制系统。依据交直流混合电力系统功率需求, 控制虚拟 APF 灵活工作在有源电力滤波、整流和并网逆变三种工作模式。在实现直流微电网与电力系统之间功率双向流动的基础上, 对交直流混合微电网系统中谐波进行治理, 提高了接口变流器的利用率, 降低了系统运行成本。仿真验证了所提虚拟 APF 拓扑结构及其控制策略的正确性及可行性。

关键词: 非线性负荷; 混合微电网; 虚拟 APF; 电能质量; 电能双向流动

Research on virtual APF of AC/DC hybrid microgrid

ZHENG Zheng, JIN Jianxin, TAO Haijun, LU Di, LI Jiwei

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The power quality of an AC bus deteriorates because of various non-linear loads entering the hybrid micro-grid, at the same time as the bidirectional flow of electric energy is required in the AC and DC bus. In this paper, a virtual APF topology and its control strategy are proposed. A constant power control system is designed using instantaneous power theory. According to the power requirements of the AC / DC hybrid power system, the virtual APF is controlled to work flexibly in three working modes i.e. active power filtering, rectifier and grid-connected inverter. Looking at realizing the bidirectional flow of between DC micro-grid and power system, the harmonics in the AC / DC hybrid micro-grid system are treated. This improves the utilization rate of the interface converter and reduces the operating cost of the system. The correctness and feasibility of the proposed virtual APF topology and its control strategy are verified by simulation.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1804143) and 2018 Key Science and Research Project of Henan Colleges and Universities (No. 18A410001).

Key words: nonlinear load; hybrid micro-grid; virtual APF; power quality; bidirectional flow of electric energy

0 引言

微电网作为大电网和分布式发电系统的纽带, 是未来智能电网的重要组成部分^[1-2]。根据所含母线的类型, 微电网可分为交流微电网、直流微电网和交直流混合微电网。交直流混合微电网因其性能较好地兼容多种交、直流电源及负荷, 可大大减少单一母线微电网中多重 AC/DC 或 DC/AC 变换器带来的功率损耗, 受到国内外学者的广泛关注^[3-6]。大量非线性负载接入混合微电网带来一些电能质量问题^[7-8]。

有源电力滤波器(APF)是一种用于动态抑制谐

波、补偿无功的新型电力电子装置, 在电力系统中得到了广泛应用^[9-12]。传统的 APF 仅担负治理谐波的作用, 在混合微电网中增大了投资及控制的复杂性。文献[13]主要研究交流微电网光伏逆变器中的谐波, 分析了分布式交流微电网中两个光伏逆变器的谐波问题, 提出采用协调控制的思想治理微电网谐波。文献[14]针对交流微电网光伏逆变器集群接入交流微电网时产生大量低次谐波的问题, 提出了有源谐波电导法抑制光伏逆变器输出的谐波电流。文献[15-16]针对交流微电网电流型谐波进行研究, 提出了一种复合逆变器的设计方法, 该设计方法在治理谐波的同时, 又可以对无功、不平衡等问题进行协调治理。以上文献只就治理交流微电网的谐波问题开展研究, 但未进行交直流混合微电网的电能

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1804143); 2018年度河南省高等学校重点科研项目资助(18A410001)

双向流动及谐波抑制研究。

直流微电网^[17-19]一般由微电源、变换器、储能装置、直流负荷组成。文献[20-21]提出了一种直流分布式发电(如光伏、超级电容器等)作为有源电力滤波器直流母线的结构,用来改善直流侧电压稳定和电网电能质量问题,但是无法实现交直流电能双向流动。文献[22-24]指出在交直流混合微电网中接口变流器是联系直流母线和交流母线的唯一桥梁,其承担着混合微电网交、直流侧的功率协调控制任务,对混合微电网系统的电压稳定起着至关重要的作用,但而没有考虑到电能质量改善问题。

综上文献的考虑,本文提出一种交直流混合微电网虚拟 APF 拓扑结构,通过对交直流接口变流器的控制,使虚拟 APF 可工作在有源电力滤波、整流和并网逆变三种工作模式,既能实现交直流电能双向流动,又能通过补偿无功改善电能质量,提高混合微电网的运行性能。

1 交直流混合微电网虚拟 APF 拓扑结构

虚拟 APF 是把直流微电网与接口变流器结合而成的一种新拓扑结构。在交直流混合电网中,接口变流器是虚拟 APF 的核心,其直流微电网为虚拟 APF 的直流母线。交直流混合微电网拓扑示意图如图 1 所示,包含有大电网、交流分布式发电、负载、隔离变压器、RLC 滤波电路和虚拟有源电力滤波器。

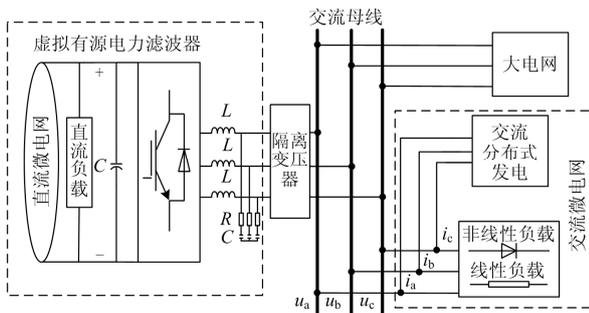


图 1 交直流混合微电网拓扑示意图

Fig. 1 Topology diagram of AC / DC hybrid micro-grid

2 虚拟 APF 控制系统原理与设计

在并网模式下,为了使交直流混合微电网中所有变换器与大电网更好地协调,虚拟 APF 不仅做交直流混合微电网的接口变流器,同时可以完成交流母线谐波治理。因此虚拟 APF 需要根据系统功率需求,灵活工作在 APF、整流、并网逆变器模式,其控制原理框图如图 2 所示。图中能量管理完成虚拟 APF 的工作模式的判断,依次给出电流指令控制,

然后电流控制产生参考电压信号驱动绝缘栅双极型晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)。

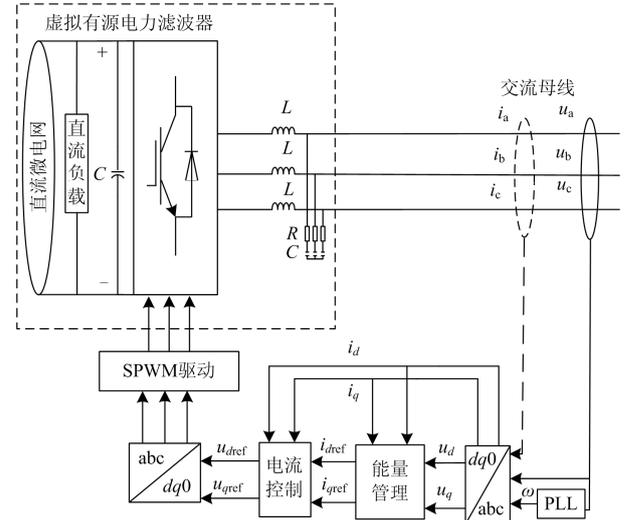


图 2 虚拟 APF 控制系统

Fig. 2 Virtual APF control system

2.1 能量管理

针对系统中所产生的有功功率和无功功率,基于瞬时无功率的理论,利用旋转坐标变换,可得在旋转坐标系下,交流母线电压、电流值如式(1)、式(2)所示。

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \omega t & \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ \sin \omega t & \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 为三相交流母线电压 u_a 、 u_b 、 u_c 在旋转坐标系下 d 、 q 轴电压值; i_d 、 i_q 为三相交流母线电流 i_a 、 i_b 、 i_c 在旋转坐标系下 d 、 q 轴电流值。

交直流混合微电网能量交换关系应遵循式(3)规律。

$$\begin{cases} P_u + P_{ac,DGS} + P_{IC} = P_{ac,loads} \\ P_{dc,loads} = P_{dc,DGS} - P_{IC} \end{cases} \quad (3)$$

式中: $P_{ac,DGS}$ 、 $P_{dc,DGS}$ 为交流和直流分布式微电网产生的瞬时功率; $P_{ac,loads}$ 、 $P_{dc,loads}$ 为交流微电网、直流微电网负载消耗功率; P_{IC} 为交流微电网与直流微电

网通过接口变流器交换的功率; P_u 为大电网的瞬时功率。

在同步旋转坐标系下, 电力系统有功功率 P 和无功功率 Q 为

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u_d \times i_d + u_q \times i_q) \\ Q = \frac{3}{2}(u_q \times i_d - u_d \times i_q) \end{cases} \quad (4)$$

根据瞬时功率提取参考电流, 计算得到 i_d 的参考电流 i_{dref} 和 i_q 的参考电流 i_{qref} , 其值为

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = -\frac{2}{3(u_d^2 + u_q^2)} \begin{bmatrix} -u_d & -u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P \\ Q \end{bmatrix} \quad (5)$$

1) 虚拟 APF 为有源电力滤波器模式: 此时直流微网与接口变流器交换有功功率为 ($P_{ic} = 0$), 并进行无功补偿, 改善交流母线的电能质量, 则此时指令电流为

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = -\frac{2}{3(u_d^2 + u_q^2)} \begin{bmatrix} -u_d & -u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ Q \end{bmatrix} \quad (6)$$

2) 虚拟 APF 为并网逆变模式: 此时接口变流器交换有功功率大于零 ($P_{ic} > 0$), 并进行交直流混合微电网能量交换, 向交流微电网注入有功功率 (P_{ac}), 改善交流母线的电能质量, 则其指令电流为

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = -\frac{2}{3(u_d^2 + u_q^2)} \begin{bmatrix} -u_d & -u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ac} \\ Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

3) 虚拟 APF 为整流模式: 此时接口变流器交换有功功率小于零 ($P_{ic} < 0$), 并进行交直流混合微电网能量交换, 向直流微电网注入瞬时功率 (P_{dc}), 改善交流母线的电能质量, 此时其指令电流为

$$\begin{bmatrix} i_{dref} \\ i_{qref} \end{bmatrix} = -\frac{2}{3(u_d^2 + u_q^2)} \begin{bmatrix} -u_d & -u_q \\ -u_q & u_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ac} + P_{dc,DGS} \\ Q \end{bmatrix} \quad (8)$$

混合微电网三种工作模式判断流程图如图 3 所示。

2.2 电流控制器设计

以 d 轴设计为例, 对电流控制器 PI 的参数进行分析, 电流内环控制框图如图 4 所示。

综合考虑电流环的较快跟随性能, 这里将电流内环设计成为典型 I 型系统, 只需以 PI 调节器零点抵消电流控制对象传递函数的极点即可, $\tau_i = \frac{L}{R}$,

校正后, 电流内环的开环传递函数为

$$W_{oi}(s) = \frac{k_p K_{PWM}}{R\tau_i s(1.5T_s s + 1)} \quad (9)$$

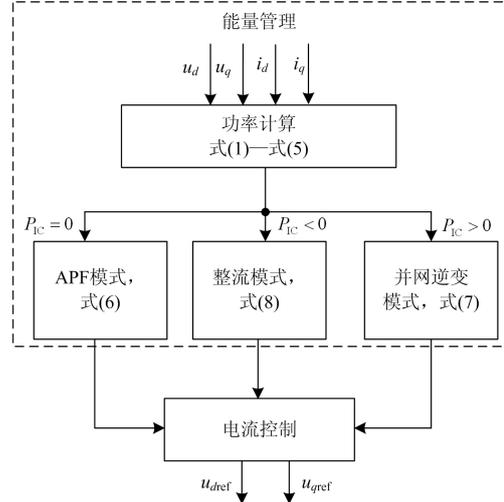


图 3 混合微电网模式判断流程图

Fig. 3 Flow chart of judging the working mode of hybrid micro-grid

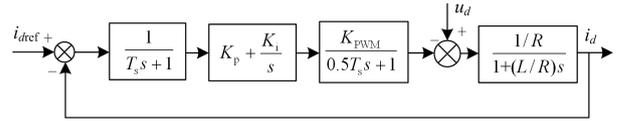


图 4 电流内环控制框图

Fig. 4 Current inner loop control block diagram

式中: K_{PWM} 为接口变流器等效增益; T_s 为电流内环采样周期; τ_i 为时间常数。

闭环传递函数为

$$W_{ci}(s) = \frac{1}{1 + \frac{R\tau_i}{k_p K_{PWM}} s + \frac{1.5T_s R\tau_i}{k_p K_{PWM}} s^2} \quad (10)$$

由典型 I 型系统整定关系, 当取系统阻尼比

$\xi = 0.707$ 时, 有

$$\frac{1.5T_s k_p K_{PWM}}{R\tau_i} = \frac{1}{2} \quad (11)$$

$$\begin{cases} k_p = \frac{R\tau_i}{3T_s K_{PWM}} = \frac{L}{3T_s K_{PWM}} \\ k_i = \frac{R}{3T_s K_{PWM}} \end{cases} \quad (12)$$

本设计取 $K_{PWM} = 2.3$ 、 $T_s = 5 \times 10^{-5} s$ 、 $L = 8 mH$ 、 $R = 0.2 \Omega$ 时, 解得 $k_p = 23.18$, $k_i = 579.7$ 。

图 5 所示是控制器参数 $k_p = 23.18$, $k_i = 579.7$ 的系统开环函数伯德图的效果。则低频增益和截止频率、相位裕度满足要求。同时相位裕度变成 64.6° 。说明电流环能够获得满意的稳态和动态性能。

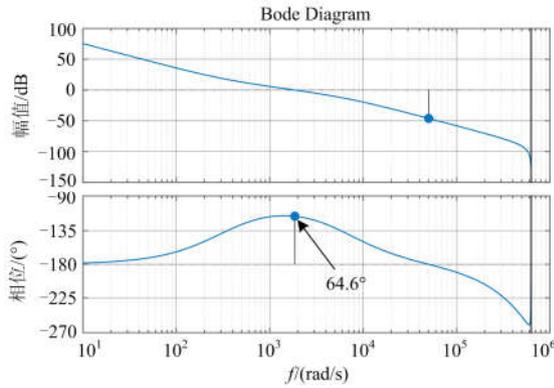


图 5 系统开环函数伯德图

Fig. 5 System open-loop function bode diagram

3 仿真验证分析

在交直流混合微电网能量和直流负载动态变化情况下，利用 Matlab 软件进行虚拟 APF 能量双向流动和电能质量改善性能仿真验证。仿真参数如表 1 所示，仿真的主拓扑结构图如图 1 所示。为了验证虚拟 APF 的作用，首先虚拟 APF 拓扑系统独立运行，与大电网无功率交换。此时大电网 A 相电流波形及相应电流 THD 如图 6、图 7 所示，电力系统中由于交流微电网中非线性负载作用使电流波形畸变严重，其 THD 为 17.33%，电能质量非常差。在 $t=0.2\text{ s}$ 、 $t=0.5\text{ s}$ 和 $t=0.8\text{ s}$ 瞬间进行三种模式的控制，以验证虚拟 APF 控制策略正确性。

表 1 交直流混合微电网主要仿真参数

参数	数值
交流微电网和大电网电压/V	380
交流微电网非线性负载/kW	13
交流微电网非线性产生无功/kvar	2.2
直流微电网电压/V	700
直流负载/kW	12
直流分布式发电额定功率/kW	12.5
接口变流器开关频率/kHz	10
变压器电感/mH	4
输出 RLC 滤波器/(Ω/mH/μF)	0.2,8,2
直流侧电容/mF	1

此时控制虚拟 APF 工作三种模式下的功率交换如图 8 所示。在 $0.2 < t < 0.5\text{ s}$ 为 APF 模式，此时 $P=0\text{ kW}$ ， $Q=2.2\text{ kvar}$ ； $0.5 < t < 0.8\text{ s}$ 为整流模式， $P=6\text{ kW}$ ， $Q=2.2\text{ kvar}$ ； $0.8 < t < 1\text{ s}$ 为并网逆变模式， $P=2\text{ kW}$ ， $Q=2.2\text{ kvar}$ 。

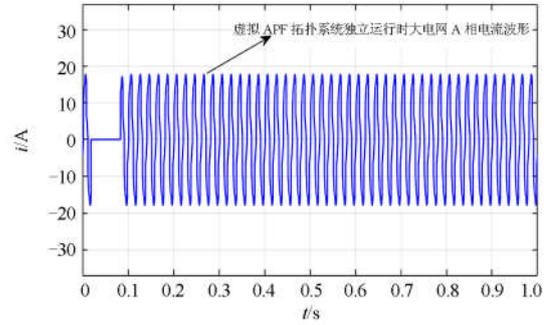


图 6 虚拟 APF 系统独立运行时大电网 A 相电流波形
Fig. 6 Phase A current waveform of large power grid when virtual APF system runs independently

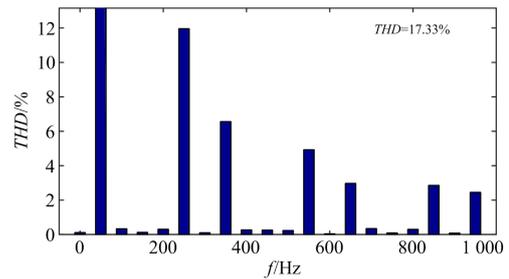


图 7 虚拟 APF 拓扑系统独立运行时大电网 A 相电流的 THD
Fig. 7 Phase A current waveform and THD of the large power grid in the independent operation of the virtual APF topology system

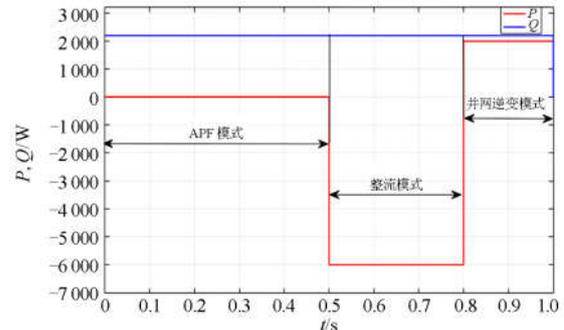


图 8 虚拟 APF 工作在三种模式下的有功和无功交换
Fig. 8 Active and reactive power exchange in three modes of virtual APF

三种运行模式下大电网 A 相电流波形的仿真验证如图 9 所示。

3.1 APF 模式： $0.2\text{ s} < t < 0.5\text{ s}$

此时大电网给负载提供 7.7 kW 的功率，总的负载包括纯电阻消耗 2.7 kW 和非线性负载消耗 5 kW、2.2 kvar，另外直流微电网提供 10.5 kW 的功率，分别提供直流负载 10 kW 消耗和接口变流器损耗所用。如图 8 所示，在 $t=0.2\text{ s}$ 时切换为 APF 模式，

此时虚拟 APF 拓扑起电力系统谐波治理作用, $P=0\text{ kW}$, $Q=2.2\text{ kvar}$; 图 9 可验证在 APF 状态, 直流微电网与大电网不进行功率交换, 只改善电能质量。通过图 10 电网、交流微电网 A 相电流波形和虚拟 APF 输出波形观察得到, 并与图 6 相比图 11 大电网电流 THD 由 17.33% 减少到 2.69%, 极大地改善了电能质量, 满足电网的运行要求。

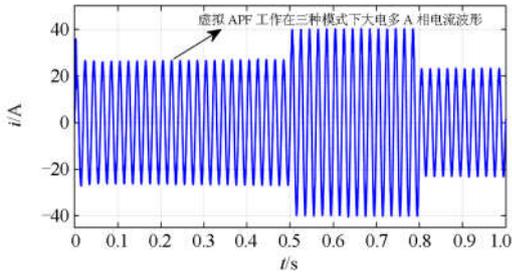


图 9 虚拟 APF 工作在三种模式下大电网 A 相电流波形
Fig. 9 Current waveform of phase A of large power grid under three modes of virtual APF working

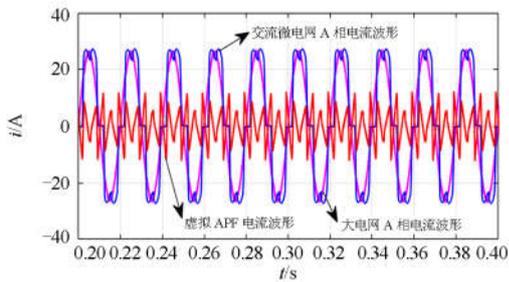


图 10 电网、交流微电网 A 相电流波形和虚拟 APF 输出波形

Fig. 10 Current waveform and virtual APF output waveform of phase A of power grid and AC micro-grid

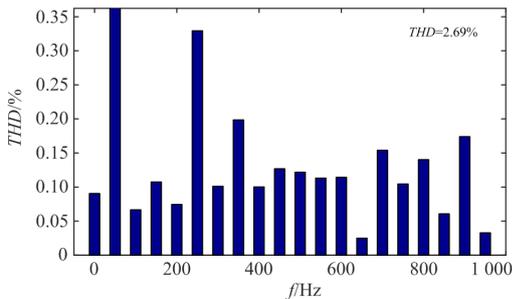


图 11 APF 模式下电网 A 相电流的 THD

Fig. 11 THD of phase A current in power grid under APF mode

3.2 整流模式: $0.5\text{ s} < t < 0.8\text{ s}$

在整流模式情况下, 直流负载由 10 kW 增加到 16 kW , 这个时候直流负载需要多余的 6 kW 能量。如图 8 所示, $t=0.5\text{ s}$ 时虚拟 APF 切换为整流状态,

此时大电网向直流微电网传输电能, 并对电力系统谐波进行治理, $P=6\text{ kW}$, $Q=2.2\text{ kvar}$ 。图 9 可验证在整流状态, 直流微电网与大电网进行功率交换, 并改善电能质量, 通过图 12 电网、交流微电网 A 相电流波形和虚拟 APF 输出波形观察得到, 并与图 6 相比图 13 大电网电流 THD 由 17.33% 减少到 1.88%, 极大地改善了电能质量, 满足电网的运行要求。

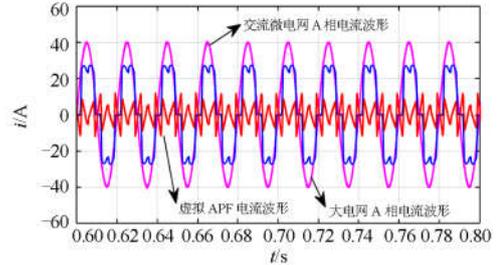


图 12 电网、交流微电网 A 相电流波形和虚拟 APF 输出波形

Fig. 12 Current waveform and virtual APF output waveform of phase A of power grid and AC micro-grid

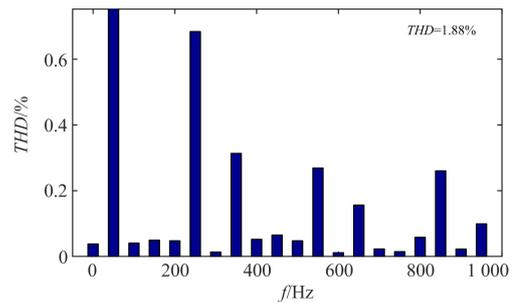


图 13 整流模式下电网 A 相电流的 THD

Fig. 13 THD of phase A current in rectifier mode

3.3 并网逆变模式: $0.8\text{ s} < t < 1\text{ s}$

在并网逆变模式下, 直流分布式发电突然由 10.5 kW 增加到 12.5 kW , 此时直流微电网产生 2 kW 多余的能量。如图 8 所示, $t=0.8\text{ s}$ 时虚拟 APF 切换为并网逆变状态, 此时大电网向直流微电网传输电能, 并对电力系统谐波进行治理, 此时 $P=2\text{ kW}$, $Q=2.2\text{ kvar}$ 。图 9 可验证在并网逆变状态, 直流微电网与大电网进行功率交换, 并改善电能质量。通过图 14 电网、交流微电网 A 相电流波形和虚拟 APF 输出波形观察得到, 并与图 6 相比图 15 大电网电流 THD 由 17.33% 减少到 3.14%, 极大地改善了电能质量, 满足电网的运行要求。

综上仿真验证可知, 针对交直流混合微电网需要电能双向流动和电能质量问题, 所提出虚拟 APF 拓扑结构及其控制策略能够在 APF 模式、并网逆变模式、整流模式三种模式下功率双向流动与电能质量统一控制, 提高混合微电网系统的性能。

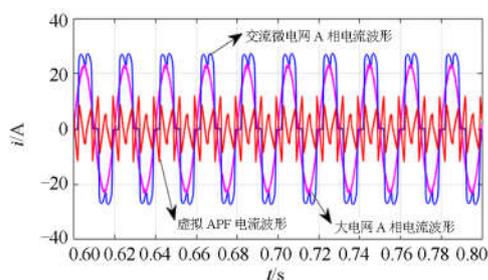


图 14 电网、交流微电网 A 相电流波形和虚拟 APF 输出波形

Fig. 14 Current waveform and virtual APF output waveform of phase A of power grid and AC micro-grid

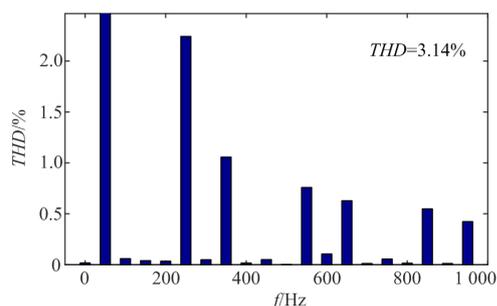


图 15 并网逆变器下电网 A 相电流的 THD

Fig. 15 THD of phase A current in power grid under grid-connected inverter

4 结论

交直流混合微电网因其性能较好地兼容多种交、直流电源及负荷的优点，非线性负载导致的混合微电网电能质量问题具有广泛的研究价值。在接口变流器基础上，本文提出一种虚拟 APF 拓扑结构及其控制策略，并进行混合微电网仿真验证，可以得到如下结论：

1) 所提虚拟 APF 拓扑结构，兼顾了接口变流器和传统 APF 拓扑的双重优点。

2) 所提控制策略通过功率计算，能量管理完成虚拟 APF 的工作模式，电流指令依次给出控制，灵活实现了在 APF 模式、并网逆变模式、整流模式三种模式下能量双向流动和电能质量统一控制，极大地改善了混合微电网的电能质量。

3) 所提控制策略提高了接口变流器的利用率，降低了系统运行成本，仿真结果验证了所提控制策略的正确性及可行性。

参考文献

[1] LI Y, VILATHGAMUWA D, LOH P. Design analysis and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.

[2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 1-12.

WANG Chengshan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 1-12.

[3] 张宋杰, 秦文萍, 任春光, 等. 双极性直流微电网混合储能系统协调控制策略[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2761-2768.

ZHANG Songjie, QIN Wenping, REN Chunguang, et al. Coordinated control strategy for hybrid energy storage system of bipolar DC microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(8): 2761-2768.

[4] LIU X, WANG P, LOH PC. A hybrid AC/DC micro-grid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.

[5] 朱永强, 贾利虎, 蔡冰倩, 等. 交直流混合微电网拓扑与基本控制策略综述[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2756-2767.

ZHU Yongqiang, JIA Lihu, CAI Bingqian, et al. Overview of AC/DC hybrid micro-grid topology and basic control strategy[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2756-2767.

[6] 孟润泉, 刘家赢, 文波, 等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2186-2193.

MENG Runquan, LIU Jiaying, WEN Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186-2193.

[7] HAMZEH M, GHAZANFARI A, MOKHTARI H, et al. Integrating hybrid power source into an islanded MV micro-grid using CHB multilevel inverter under unbalanced and nonlinear load conditions[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013, 28(3): 643-651.

[8] 曾正. 多功能并网逆变器及微电网应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

ZENG Zheng. Multifunctional grid-connected inverter and micro-grid application[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.

[9] 于晶荣, 粟梅, 孙尧. 有源电力滤波器的改进重复控制及其优化设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 235-242.

YU Jingrong, SU Mei, SUN Yao. Improved repetitive control of active power filter and its optimal design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 235-242.

[10] 尹春杰, 王芳, 石磊, 等. 基于瞬时电压矢量定向的有源电力滤波器补偿电流检测[J]. 电工技术学报, 2017,

- 32(7): 112-118.
- YIN Chunjie, WANG Fang, SHI Lei, et al. Compensation current detection of active power filter based on instantaneous voltage vector orientation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 112-118.
- [11] 王雪, 高云广, 吝伶俐, 等. 有源电力滤波器的研究现状与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 177-186.
- WANG Xue, GAO Yunguang, LIN Lingyan, et al. Research status and prospects of active power filters[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 177-186.
- [12] 张国澎, 周犹松, 郑征, 等. 有源电力滤波器指定次谐波补偿优化限流策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 46-53.
- ZHANG Guopeng, ZHOU Yousong, ZHENG Zheng, et al. Research on optimal current limit strategy of specified subharmonic compensation for active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 46-53.
- [13] HE J, LI Y, BOSNJAK D, et al. Investigation and active damping of multiple resonances in a parallel-inverter-based micro-grid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(1): 234-246.
- [14] 孙振奥, 杨子龙, 王一波, 等. 光伏并网逆变器集群的谐振原因及其抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(2): 418-425.
- SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. Resonance causes and suppression methods of photovoltaic grid-connected inverter clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(2): 418-425.
- [15] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 28-67.
- ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. Multi-functional grid-connected inverter and its application in power quality customization of microgrid[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 28-67.
- [16] 曾正, 杨欢, 赵荣祥. 多功能并网逆变器及其在微电网中的应用[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 28-34.
- ZENG Zheng, YANG Huan, ZHAO Rongxiang. Multifunctional grid-connected inverter and its application in microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 28-34.
- [17] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.
- WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.
- [18] 刘家赢, 韩肖清, 王磊, 等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2356-2362.
- LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operational control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2356-2362.
- [19] 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. Summary of key technologies research of DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [20] DYBKO M A, BROVANOV S V. Active power filter with battery energy storage based on NPC inverters[C] // Proceedings of 16th Conference on Micro/Nano Technologies and Electronics Devices EDM, 2015, 5(3): 415-421.
- [21] DONG D, LUO F, ZHANG X, et al. Grid-interface bidirectional converter for residential DC distribution systems-part 2: AC and DC interface design with passive components minimization[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1667-1679.
- [22] LU Xiaonan, GUERRERO J M, SUN Kai, et al. Hierarchical control of parallel AC-DC converter interfaces for hybrid microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(2): 683-692.
- [23] EGHTEADARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [24] 蔡杰, 刘子文, 苗世洪, 等. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 96-102.
- CAI Jie, LIU Ziwen, MIAO Shihong, et al. Study on voltage fluctuation control strategy of bidirectional AC/DC converter in isolated AC/DC hybrid microgrid based on disturbance observer[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 96-102.

收稿日期: 2019-06-26; 修回日期: 2019-08-27

作者简介:

郑征(1965—), 女, 博士, 教授, 研究方向为可再生能源功率变换与并网技术; E-mail: zhengzh@hpu.edu.cn

金建新(1990—), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合微电网电能质量及控制技术; E-mail: 1536265371@qq.com

陶海军(1980—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为大功率开关电源及其控制。E-mail: 304809567@qq.com

(编辑 葛艳娜)