

DOI: 10.7667/PSPC160870

交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法

祝钧¹, 李瑞生², 毋炳鑫², 高峰¹

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 随着分布式发电技术的推广, 交直流混合微网以其灵活性正得到越来越广泛的研究和应用, 而接口变流器是其核心部件。提出了一种接口变换器虚拟同步发电机控制策略。该策略不仅能使交直流子网有功功率分配更加均匀, 还能使系统在大容量负荷投切过程中响应更加平滑, 降低交直流子网快速功率波动的耦合影响。Matlab/Simulink 仿真算例的验证结果表明, 提出的接口变换器虚拟同步发电机控制方法能够降低交直流子网功率传导影响, 有利于提高交直流微电网的运行稳定性。

关键词: 交直流混合微电网; 虚拟同步发电机; 接口变换器; 下垂控制

Virtual synchronous generator operation of interlinking converter between AC and DC microgrids

ZHU Jun¹, LI Ruisheng², WU Bingxin², GAO Feng¹

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

Abstract: With the development of distributed generation technologies, AC/DC hybrid microgrid is getting more and more extensive research and applications, where the interlinking converter (IC) is one of the key components. This paper proposes a novel interlinking converter control method based on current-controlled virtual synchronous generator (VSG). By employing the proposed method, the microgrid can not only properly share the loads between the AC and DC sub-grids under the steady state, but also smooth the response of the whole system during the significant load disturbance and reduce the coupling influence of fast power fluctuation of AC/DC sub-network. Matlab/Simulink simulations verify that the proposed method can lower power conduction influence of AC/DC sub-network and help to improve the operation stability of AC/DC microgrid.

Key words: hybrid AC/DC microgrid; virtual synchronous generator; interlinking converter; droop control

0 引言

交直流混合微电网含有交、直流母线, 可以方便连接交流电源、交流负荷与直流电源、直流负荷, 减少电能转换设备, 降低损耗及电网建设成本, 提高能源综合利用效率^[1-3]。

交直流混合微电网的控制方式相对于单独的交流微网或直流微网更加复杂^[4]。在交直流微电网离网运行时, 交/直流子网间的功率控制成为重要的控制对象, 对交直流微电网的稳定运行有非常重要的作用。交直流微电网的接口变换器不仅需要同时考虑直流母线电压和交流母线的电压、频率, 而且还要兼顾交直流子网内的功率平衡。文献[5-6]提出了一种双向下垂控制方法, 该方法将交流子网频率和直流子网电压进行了归一化处理, 使交/直流子网

的有功功率可以相互比较, 并进行合理的潮流控制。文献[7]提出了一种接口变换器的分层控制方法, 可将下垂控制引起的电压偏差限制在一定范围内, 并且有利于微电网和配电网之间的功率交换。总的来说, 接口变换器在交/直流子网间的潮流分配可以优化微电网的运行效率, 提高稳定性, 保证了交直流子网间的紧密耦合。

接口变换器的耦合作用也可能使一个子网的功率波动迅速传递至另一个子网, 从而当一个子网内有大容量负荷投切或短时故障时, 将扩大暂态影响范围, 影响到相邻子网, 从而对整个交直流微电网的稳定运行产生不利影响。与传统电网相比, 微电网的容量小, 电力电子设备渗透率高, 系统惯性不足, 使得微网离网运行时系统电压或频率对电源出力 and 负荷波动十分敏感, 而系统的电压和频率波

动反过来又会显著影响微电网内的电源和负荷的运行。例如, 包括我国在内的许多国家都对逆变器并网的频率条件进行限制, 如我国 Q/GDW667—2011 等标准规定, 当电网频率大于 50.5 Hz 或小于 48 Hz 时逆变器应在 0.2 s 内停机^[8-9]。而且, 微网内的许多负荷都是频率敏感设备, 如感应电动机、空调等工况随着频率变化而变化, 过大的频率变化速率或范围会严重影响该类负荷的正常运行, 甚至毁坏设备。此外, 当今的许多电力系统都配置了 df/dt 继电器, 在 df/dt 超出限值时进行报警或者减载^[10], 交直流微电网内的功率波动可能使该类保护误动作。

本文针对该问题, 提出了交直流混合微电网接口变换器的虚拟同步发电机(Virtual Synchronous Generator, VSG)控制方法, 该方法兼具双向下垂控制和虚拟同步发电机控制的特性, 可以减弱功率波动在交直流子网间的传导影响。本文使用 Matlab/Simulink 仿真分析了一个交直流微电网的算例, 验证了接口变换器 VSG 的控制效果。

1 双向下垂控制和虚拟同步发电机概述

1.1 双向下垂控制

交直流混合微电网的传统有功功率下垂控制包括交流频率-有功(f - P)下垂和直流电压-有功(U_{dc} - P)下垂两种方法, 它们分别单独考虑交流流量和直流量对接口变换器传输有功功率的影响^[11]。在此前提下, 各子网的有功配额将直接反应在交流频率或直流母线电压上, 接口变换器通过检测其两侧的母线电压, 就能判断两侧有功缺额或盈余, 进而得到有功指令, 从而实现交直流微电网的有功负荷合理分配。

图 1 是交直流微电网的典型结构。该微网主要由交流子网、直流子网和接口变换器组成, 两个子网通过接口变换器耦合。交流子网通过公共连接点(Point of Common Coupling, PCC)处的断路器与大电网相连, 离网运行时断开该断路器。每个子网内包含有本地负荷, 分布式电源和储能装置, 各单元间分布着与距离成正比的线路阻抗。假设交流子网线路阻抗呈感性, 此时交流负荷的变化能直接反应在频率上^[6]。将交流频率和直流电压归一化可得

$$\begin{aligned} f_{ac,pu} &= \frac{f - 0.5(f_{max} + f_{min})}{0.5(f_{max} - f_{min})} \\ V_{dc,pu} &= \frac{V_{dc} - 0.5(V_{dc,max} + V_{dc,min})}{0.5(V_{dc,max} - V_{dc,min})} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: f_{max} 和 f_{min} 是交流子网允许频率的最大值和最

小值; f 为接口变换器测得的交流子网频率值; $f_{ac,pu}$ 为交流子网频率的归算值; $V_{dc,max}$ 和 $V_{dc,min}$ 是直流子网电压的允许最大值和最小值; V_{dc} 是接口变换器直流电压; $V_{dc,pu}$ 是接口变换器直流电压的归算值。

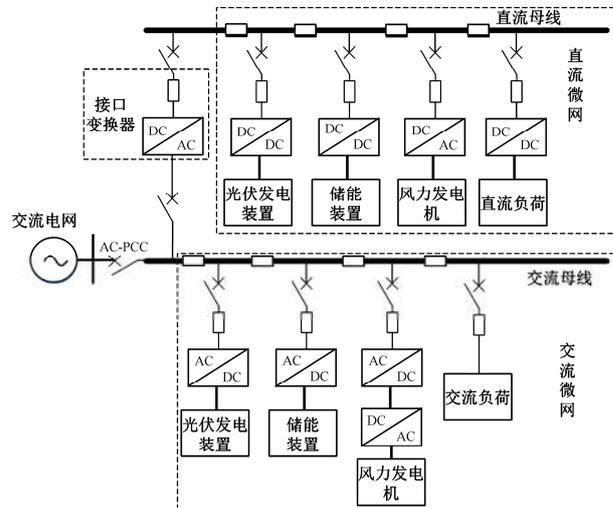


图 1 交直流混合微网典型结构

Fig. 1 A typical structure of AC/DC hybrid microgrids

双向下垂控制框图如图 2 所示。经过归一化处理, 交流子网频率和直流子网电压可以进行直接比较, 他们的差异反映了两个子网有功功率的不平衡程度。为了反映这个差异, 定义归一化变量的差:

$$e_{pu} = V_{dc,pu} - f_{pu} \quad (2)$$

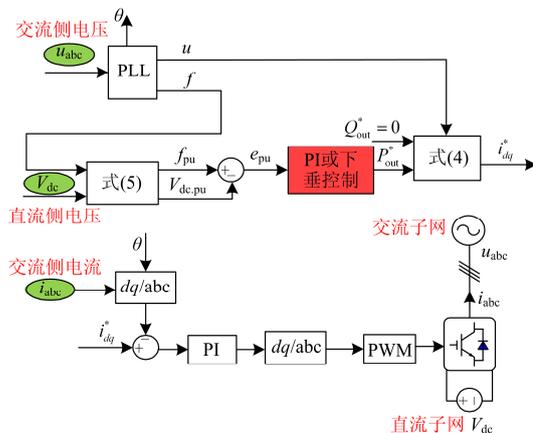


图 2 接口变换器双向下垂控制策略

Fig. 2 Bi-directional droop control of interlinking converters

当整个微网中只有一个接口变换器, 可以将 e_{pu} 送入比例积分(PI)调节器, 其输出即可作为接口变换器需要在子网间传输的有功功率, 以保持 $V_{dc,pu} = f_{pu}$ 。当微网中含有多个接口变换器时, 通常在多个接口变换器间使用下垂控制分配交直流子网

间交换的有功功率^[5-6]。

接口变换器采用双向下垂控制可得输出功率的指令为

$$P_{n,ico}^* = P_{n0}^* + k_{n,ic} e_{npu} = P_{n0}^* + k_{n,ic} (V_{ndc,pu} - f_{npu}) \quad (3)$$

式中： $P_{n,ico}^*$ 是第 n 个接口变换器的输出有功功率指令； P_{n0}^* 是第 n 个接口变换器在两侧负荷平衡时应输出的有功功率；通常 $P_{n0}^* = 0$ 即接口变换器在交直流子网功率平衡时不传递有功功率。 $k_{n,ico}$ 是第 n 个接口变换器输出的有功功率下垂系数； f_{npu} ， $V_{ndc,pu}$ ， e_{npu} 分别是第 n 个接口变换器测得的交流频率归算值，直流电压归算值和两者的差。

假设 $P_{n0}^* = 0$ ，当 $P_{n,ico}^* > 0$ 时，功率指令为正值，能量从直流母线流向交流母线，接口变换器工作在逆变状态；当 $P_{n,ico}^* < 0$ 时，功率指令为负值，能量从交流母线流向直流母线，接口变换器工作在整流状态；当 $P_{n,ico}^* = 0$ 时，接口变换器两侧子网有功功率需求水平相当，接口变换器两侧子网间没有功率流动。采用双向下垂控制调节接口变换器的传输功率可保证能量总是流向负荷需求更大的子网。因此无论负荷波动发生在直流侧还是交流侧，交流电源与直流电源都会共同分担负荷波动，有效实现能源的合理利用。

1.2 虚拟同步发电机技术

交直流微电网接口变换器的主电路及控制结构如图 3 所示。为了改善输出电流波形的品质，其主电路为采用 LCL 滤波器的三相全桥逆变电路。本节主要论述接口变换器模拟同步发电机的有功调节特性，即转子特性和一次调频机制，交流母线的无功调节和电压幅值控制主要由各交流电源实现^[5]，故本文不再详述。

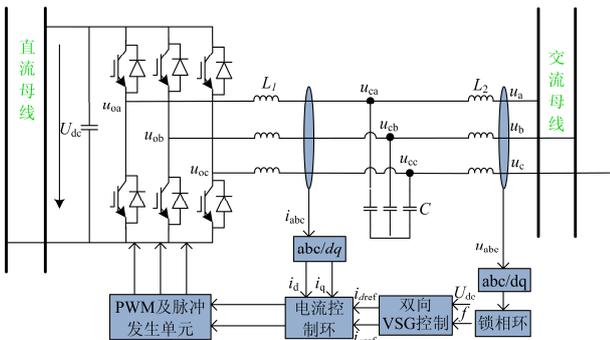


图 3 混合微网接口变换器的拓扑和控制策略图

Fig. 3 Topology and control strategy of hybrid microgrids interlinking converters

同步发电机的转子运动方程为^[12-16]

$$J\omega \frac{d\omega}{dt} = P_m - P_e - D(\omega - \omega_0) \quad (4)$$

式中： P_m 和 P_e 分别为同步发电机的输入机械功率和电磁功率； ω 为同步发电机的电角速度（设极对数为 1，其等于同步发电机的机械角速度）； ω_0 为电网额定电角速度； J 为转子转动惯量； D 为阻尼因子。

由式(4)可知，当同步发电机的输出功率大于输入机械功率时，转子 $J\omega \frac{d\omega}{dt} < 0$ ，即转子速度下降；而当输出功率小于输入机械功率时，转子 $J\omega \frac{d\omega}{dt} > 0$ ，即转子速度上升。

将式(4)线性化处理，可得其拉普拉斯变换形式为

$$\Delta\omega(s) = \frac{P_m - P_e}{J\omega_0 s + D} \quad (5)$$

式中， $\Delta\omega(s) = \omega - \omega_0$ 为变换器的输出角频率偏移量。

式(5)表明，VSG 在稳态时与下垂控制具有等效性，而暂态过程可以等效为一个低通滤波环节，通过选择转动惯量 J ，相当于改变延时环节的时间常数。

2 接口变换器的虚拟同步发电机技术

2.1 双向下垂控制的局限性分析

双向下垂控制能够在交直流子网之间实现负荷的合理分配。但是，双向下垂控制将两个子网完全耦合，当一侧子网负荷发生波动，经过接口变换器的控制，另一侧的子网几乎不加延时的受到扰动，相当于扩大了负荷波动影响的范围。

图 4 是简化的交直流混合微网模型，为了便于分析，将两个子网简化为仅各有一个分布式电源和负荷的理想微网。当微电网稳定运行时，各子网有功功率满足能量守恒。

$$P_{I_k} + P_{S_k} + P_{U_k} = P_{L_k} \quad (6)$$

式中：下标 k 是子网序号； P_{I_k} 是接口变换器流入子网 k 的有功功率； P_{S_k} 为子网 k 内所有电源发出的有功功率之和； P_{U_k} 是并网连接时配电网流入子网 k 的有功功率，离网运行时 $P_{U_k} = 0$ ； P_{L_k} 为子网 k 内所有有功负荷之和。

若忽略接口变换器自身损耗，那么接口变换器从一侧子网吸收的功率等于向另一子网发送的功率，在图 4 中可以表示为 $P_{I_1} = -P_{I_2}$ 。

假设交流微电源 DG1 采用有功功率-频率下垂控制，直流微电源 DG2 采用有功功率-直流电压下

垂控制, 接口变换器采用双向下垂控制。此时交流子网发生 ΔP_{L1} 负荷波动, 在负荷波动后的极短时间内, DG1 的角频率按下垂特性变化为

$$\Delta\omega_{dg1} = -k_{p1}\Delta P_{out_dg1} \quad (7)$$

式中: ΔP_{out_dg1} 为 DG1 输出功率的变化量; k_{p1} 为 DG1 有功功率下垂系数; $\Delta\omega_{dg1}$ 是由下垂控制引起的 DG1 角速度的变化量; 由式(6)可得 $\Delta P_{out_dg1} = \Delta P_{L1}$ 。

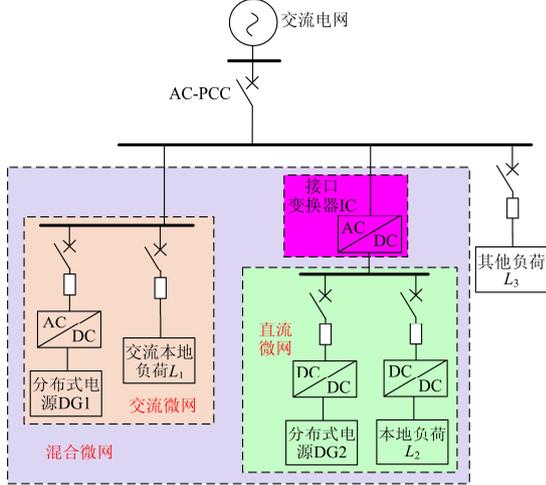


图4 简化的交直流混合微电网模型
Fig. 4 A simplified AC/DC microgrids

设直流母线电压在这极短时间内尚未变化, 根据(3)式, 并考虑到 $P_{n.ic0}^* = P_{L1}^*$, 接口变换器流向交流子网的输出功率变化量为

$$\Delta P_{L1}^* \approx -k_{n.ic}\Delta f_1 = -k_{n.ic} \frac{\Delta\omega_{dg1}}{2\pi} \quad (8)$$

如前所述, 忽略接口变换器的有功损耗, 则 $\Delta P_{L1} = -\Delta P_{L2}$ 。

直流电源 DG2 输出电压变化量满足 $U_{dc}-P$ 下垂特性。

$$\Delta V_{dc} \approx -k_{p2}\Delta P_{out_dg2} \quad (9)$$

式中: ΔP_{out_dg2} 为 DG2 输出功率的变化量且 $\Delta P_{out_dg2} = -\Delta P_{L2} = \Delta P_{L1}$; k_{p2} 为 DG2 有功功率下垂系数; ΔV_{dc} 是由下垂控制引起的 DG2 直流电压变化量。

结合式(7)~式(9)可以得到交流负荷波动传递到直流电压的波动量为

$$\Delta V_{dc} \approx \frac{-k_{p1}k_{n.ic}k_{p2}}{2\pi(T_{\Sigma}s+1)}\Delta P_{L1} \quad (10)$$

式中, T_{Σ} 是负荷波动传播过程中的综合延时常数。由于电力电子器件响应速度快, 所以 T_{Σ} 很小, 这表明当交流侧发生了负荷波动 ΔP_{L1} , 直流侧电压紧接着就发生了电压波动 ΔV_{dc} 。

2.2 接口变换器的虚拟同步发电机技术

为了避免一侧子网受到来自另一侧子网频繁负荷扰动或大负荷快速扰动的影 响, 本文将微电源 VSG 概念进行扩展, 在双向下垂控制基础上提出了接口变换器的 VSG 控制, 该控制方法和双向下垂控制具有相同的稳态特性, 而且相比于双向下垂控制具有更优秀的动态特性和抗扰能力, 更有利于整个微电网内电源和负荷的稳定运行。

用接口变换器 VSG 控制特性方程式(11)代替式(3)产生输出功率参考值。

$$J_v \frac{dP_{n.ico}^*}{dt} = e_{npu} - D_v(P_{n.ico}^* - P_{no}^*) \quad (11)$$

式中: J_v 是接口变换器功率响应的虚拟惯性系数, 它表征了一侧子网发生负荷波动, 另一侧子网受到影响的速度; D_v 是接口变换器传递功率的“等效阻尼”。式(11)的拉式变换为

$$\Delta P_{n.ico}^*(s) = \Delta P_{L1}^*(s) = \frac{\Delta e_{npu}(s)/D_v}{T_v s + 1} \quad (12)$$

式中, $T_v = \frac{J_v}{D_v}$ 是双向虚拟同步发电机控制的惯性时间常数。

用式(12)代替式(8)并考虑综合延时, 得到交流负荷波动直流电压的响应为

$$\Delta V_{dc} \approx \frac{-k_{p1}k_{p2}/D_v}{2\pi(T_v s + 1)(T_{\Sigma} s + 1)}\Delta P_{L1} \approx \frac{-k_{p1}k_{p2}/D_v}{2\pi((T_v + T_{\Sigma})s + 1)}\Delta P_{L1} \quad (13)$$

要使接口变换器的 VSG 控制与双向下垂控制有相同的稳态响应, 即当 $\frac{dP_{n.ico}^*}{dt} = 0$ 时由式(11)得到的有功输出指令与式(8)相同, 由此解得

$$D_v = \frac{1}{k_{mic}} \quad (14)$$

按式(14)得到的 D_v 代入式(13), 得

$$\Delta V_{dc} \approx \frac{-k_{p1}k_{p2}k_{mic}}{2\pi((T_v + T_{\Sigma})s + 1)}\Delta P_{L1} \quad (15)$$

当 $t \rightarrow \infty (s \rightarrow 0)$ 时与式(10)的双向下垂控制具有相同的直流电压稳态响应。

同样的, 当直流子网发生负荷波动 ΔP_{L2} , 直流微电源 DG2 按 $U_{dc}-P$ 下垂特性改变直流电压:

$$\Delta V_{dc} \approx -k_{p2}\Delta P_{L2} \quad (16)$$

在交流子网频率发生变化前, 接口变换器按式(12)控制其功率:

$$\Delta P_{1-1}^*(s) = \frac{\Delta e_{npu}(s)/D_v}{T_v s + 1} = \frac{-k_{p2} \Delta P_{L2}/D_v}{T_v s + 1} \quad (17)$$

考虑交流子网内功率守恒有 $\Delta P_{1-1} = -\Delta P_{out_dg1}$ ，则交流 DG1 的下垂特性为

$$\Delta \omega_{dg1} = -k_{p1} \Delta P_{out_dg1} = k_{p1} \Delta P_{1-1}(s) = \frac{-k_{p1} k_{p2} \Delta P_{L2}/D_v}{T_v s + 1} \quad (18)$$

考虑综合延时，最终交流子网的频率波动响应为

$$\Delta f_1 \approx \frac{-k_{p1} k_{p2}/D_v}{2\pi(T_v s + 1)(T_\Sigma s + 1)} \Delta P_{L2} \approx \frac{-k_{p1} k_{p2}/D_v}{2\pi((T_v + T_\Sigma)s + 1)} \Delta P_{L2} \quad (19)$$

与前述直流电压波动类似，接口变换器使用 VSG 控制与双向下垂控制有相同的稳态特性。

对比式(13)、式(19)与式(10)，可以看到相对于双向下垂控制，接口变换器 VSG 控制相当于引入一个可调低通滤波环节 $1/(T_v s + 1)$ ，该环节改善了微电网的动态响应特征，可以滤除有功负荷的高频扰动，提高系统的抗扰性，避免负荷投切带来的电压及频率的快速大幅度震荡。

为了有效设置等效时间常数 T_v ，可设交流频率及其变化率和直流电压及其变化率分别满足

$$|f - f_0| \leq M_1 \quad (20)$$

$$\left| \frac{df}{dt} \right| \leq M_2 \quad (21)$$

$$|V_{dc} - V_{dc0}| \leq M_3 \quad (22)$$

$$\left| \frac{dV_{dc}}{dt} \right| \leq M_4 \quad (23)$$

式中： f_0 和 V_{dc0} 分别为交流频率和直流电压额定值； M_1, M_3 分别为交流频率和直流电压最大允许变化范围； M_2, M_4 分别为综合考虑系统电源、负荷和保护装置要求的频率变化率和直流电压变化率的最大值。接口变换器要将频率和电压中的高频分量适当衰减才能满足式(20)~式(23)的条件，那么时间常数 T_v 可以取为

$$\frac{1}{T_v} = \min \left\{ \frac{M_2}{M_1}, \frac{M_4}{M_3} \right\} \quad (24)$$

3 仿真分析

为了验证接口变换器 VSG 控制对负荷波动传递的抑制效果，本节在 Matlab/Simulink 搭建了图 1 所示的交直流混合微电网仿真模型，对比验证当交流子网发生负荷波动时，接口变换器使用双向下垂控制和 VSG 控制对微电网内子网的动态过程的影响。交直流微电网仿真参数如表 1 所示。设微电网运行在离网模式。

表 1 交直流微电网仿真参数

Table 1 Simulation parameters of hybrid AC/DC microgrid

仿真参数	数值
额定交流线电压	380 V
交流电源 1 容量	40 kW
交流电源 1 下垂系数	0.0125
交流电源 2 容量	20 kW
交流电源 2 下垂系数	0.025
交流负荷 1 容量	20 kW
交流负荷 2 容量	40 kW
交流负荷 3 容量	20 kW
交流母线阻抗	0.01+j0.0628 Ω
额定直流电压	700 V
直流电源 1 容量	20 kW
直流电源 1 下垂系数	1.05
直流电源 2 容量	30 kW
直流电源 2 下垂系数	0.7
直流负荷 1 容量	20 kW
直流负荷 2 容量	30 kW
直流负荷 3	20 kW
直流母线电阻	0.1 Ω
接口变换器 D_v	1/12 000

采用式(1)对交流子网频率和直流子网电压进行归一化处理，设交流子网频率波动范围 50 ± 0.5 Hz，即 $f_{max}=50.5$ Hz， $f_{min}=49.5$ Hz；直流子网电压波动范围 700 ± 30 V，即 $V_{dc,max}=730$ V， $V_{dc,min}=670$ V。

开始运行时，投入所有交直流微电源，同时投入交流负荷 1、2 和直流负荷 1、2。此时各个子网功率平衡，电压和频率都是稳定运行在额定值，接口变换器理论上应不传递有功功率，但由于母线阻抗的影响，接口变换器两端经归一化处理的电气量并不严格相等，所以接口变换器还是会传递少量的功率。

当 $0 \text{ s} < t < 1 \text{ s}$ ，交流负荷 3 尚未投入，交流侧频率稳定在 50 Hz 左右，直流侧电压则稳定在 700 V 上下，微电网运行在额定状态下。

当 $t=1 \text{ s}$ 时，投入交流负荷 3。分别取 T_v 为 0 s（等效于双向下垂控制），0.05 s，0.1 s，得到交流电压电流波形如图 5 所示，交流侧频率和直流侧电压与电流的响应曲线如图 6 所示。图 5 交流电流波形可以看到 T_v 的增大影响了功率的响应速度，即随着 T_v 增大功率响应逐渐变慢。为了观察交流电压的频率变换，将图 5 电压波形经频率分析得到了图 6(a) 交流频率响应动态过程。从图上可以看到，三条交流频率曲线都经过约 0.3 s 的暂态振荡过程逐渐稳定在 49.93 Hz 左右，而且惯性时间常数的变化并未对频率响应产生明显影响。图 6(b) 显示了交流负荷投入后直流电压的动态响应。交流负荷投入后，交流侧有功功率出现缺额；当 $T_v=0 \text{ s}$ ，接口变换器 VSG 控制等效于双向下垂控制，直流侧电源马上响应并

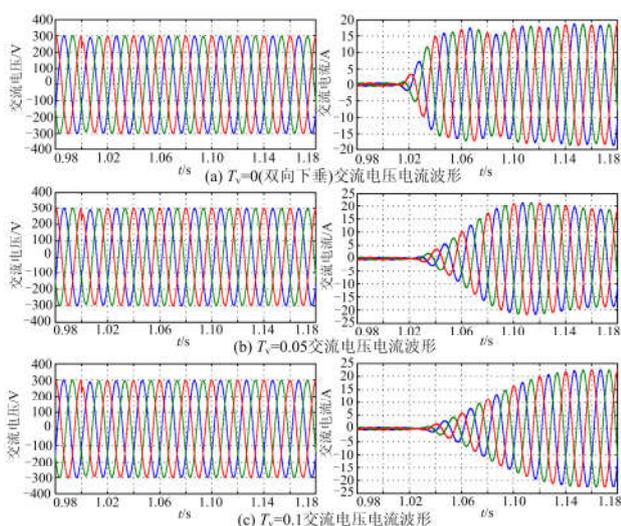


图 5 投入 20 kW 交流负荷时接口变换器交流侧电压电流波形
Fig. 5 AC voltage and current waveforms of interlinking converter when a 20 kW load increases in the AC sub-grid

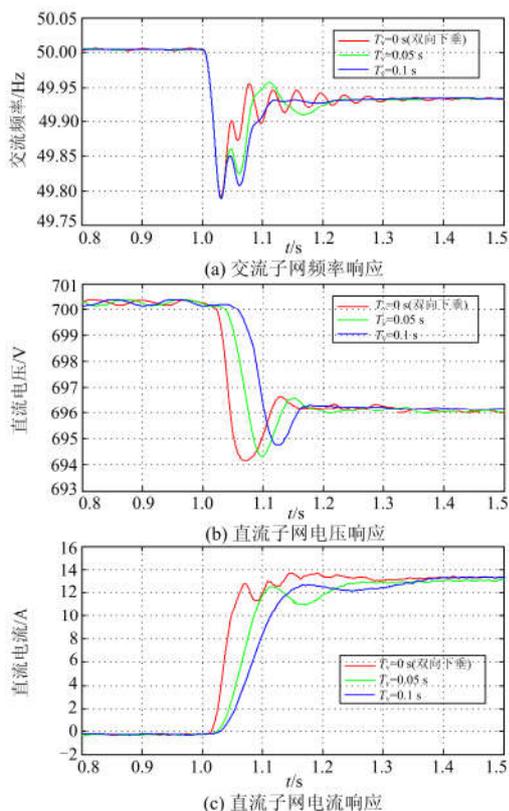


图 6 投入 20 kW 交流负荷时的微网频率和电压响应特性
Fig. 6 Frequency and voltage responses of microgrid when a 20 kW load increases in the AC sub-grid

为交流侧提供支持, 此时直流侧的响应是三种情况中最迅速的, 直流电压变化率也最快。随着 T_v 增大, 电压变化率逐渐减慢, 响应延时依次增大, 有利于

提高直流子网抗扰能力^[14]。经过约 0.3 s 的调整, 三条电压响应曲线都稳定在 696 V 附近, 这说明惯性时间常数 T_v 不影响电压的稳态性能。

同样的, 当直流子网在 $t=1$ s 时投入直流负荷 3, 图 7 为直流侧发生扰动时交流侧电压电流波形; 图 8 为交流频率和直流电压与电流的响应过程。从

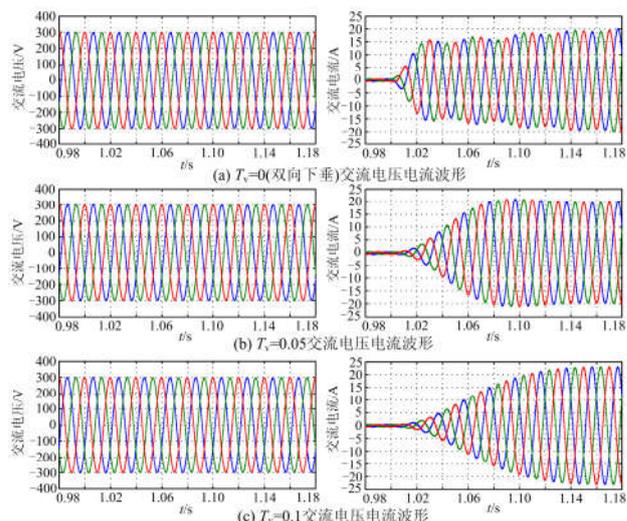


图 7 投入 20 kW 直流负荷时接口变换器的交流电压电流波形
Fig. 7 AC voltage and current waveforms when a 20 kW load increases in the DC sub-grid

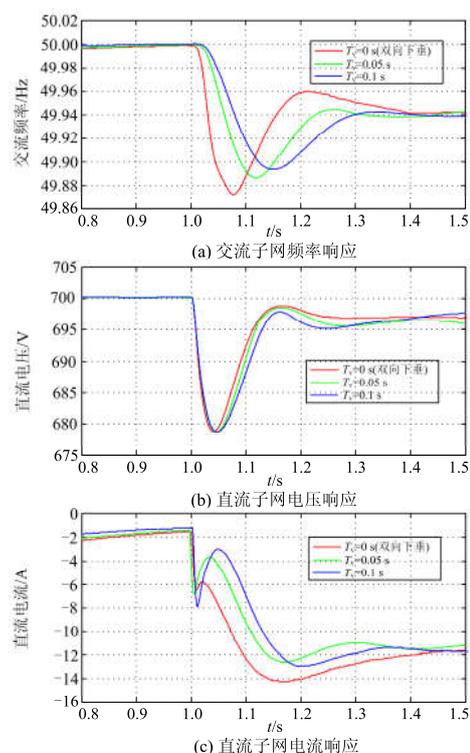


图 8 投入 20 kW 直流负荷的微网响应
Fig. 8 Frequency and voltage responses of microgrid when a 20 kW load increases in the DC sub-grid

图 8 可以看到,随着 T_v 增大,交流侧频率动态响应逐渐变得平缓,接口变换器 VSG 控制的频率响应比双向下垂控制明显更具稳定性,但 T_v 并不影响频率的稳态响应精度。

综上所述,接口变换器的 VSG 控制可以在直流侧或交流侧功率波动的情况下,使接口变换器的响应速度可调,相比双向下垂控制提高了系统的抗扰性和稳定性。同时,接口变换器的 VSG 控制不影响系统的稳态响应性能,即系统任一子网的负荷缺额仍可以由全网平均分配,保留了双向下垂控制的稳态特性。

4 结论

本文提出了交直流混合微电网接口变换器虚拟同步发电机控制方法。不同于双向下垂控制,接口变换器的 VSG 控制不仅能同时根据交直流母线的工作状况,将负荷合理分配,而且还能减弱因为交直流耦合造成的负荷扰动传递,提高整个系统的运行稳定性。通过 Matlab/Simulink 仿真验证了接口变换器的 VSG 控制方法的有效性。

参考文献

- [1] BLAABJERG F, CHEN Z, KJAER S B. Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1184-1194.
- [2] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [3] 李瑞生. 云—层—端三层架构体系的随机性电源即插即用构想[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(7): 47-54.
LI Ruisheng. Idea of random power supply plug and play based on cloud-layer-terminal three layer architecture[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(7): 47-54.
- [4] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.
- [5] 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.
- [6] 高泽, 杨建华, 季宇, 等. 交直流混合微电网接口变换器双向下垂控制[J]. 南方电网技术, 2015, 9(5): 82-87.
GAO Ze, YANG Jianhua, JI Yu, et al. Bidirectional droop control of AC/DC hybrid microgrid interlinking converter[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(5): 82-87.
- [7] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [8] 分布式电源接入配电网运行控制规范: Q/GDW667—2011[S].
- [9] 分布式电源接入电网技术规定: Q/GDW 480—2010[S].
- [10] ALBU M, POPOVICI R. Rate of change of frequency – a power quality descriptor[C] // 2014 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014: 312-316.
- [11] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [12] BEVRANI H, ISE T, MIURA Y. Virtual synchronous generators: a survey and new perspectives[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54: 244-254.
- [13] ZHONG Q C, WEISS G. Synchro inverters: inverters that mimic synchronous generators[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(4): 1259-1267.
- [14] LIU J, MIURA Y, ISE T. Comparison of dynamic characteristics between virtual synchronous generator and droop control in inverter-based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(5): 3600-3611.
- [15] 郑天文, 陈来军, 陈天一, 等. 虚拟同步发电机技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 165-175.
ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, CHEN Tianyi, et al. Review and prospect of virtual synchronous generator techniques[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 165-175.
- [16] SHINTAI T, MIURA Y, ISE T. Oscillation damping of a distributed generator using a virtual synchronous generator[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 668-676.

收稿日期: 2016-06-14; 修回日期: 2016-10-08

作者简介:

祝 钧(1989—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网分析与控制。E-mail: zhujun_scu@foxmail.com

(编辑 张爱琴)