

一种基于虚拟电机控制的能量路由器

盛万兴¹, 刘海涛¹, 曾正², 吕志鹏¹, 谭骞³, 段青¹, 冉立²

- (1. 配电变压器节能技术北京市重点实验室(中国电力科学研究院), 北京市海淀区 100192;
2. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市沙坪坝区 400044;
3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市昌平区 102206)

An Energy Hub Based on Virtual-Machine Control

SHENG Wanxing¹, LIU Haitao¹, ZENG Zheng², LÜ Zhipeng¹, TAN Qian³, DUAN Qing¹, RAN Li²

(1. Beijing Key Laboratory of Distribution Transformer Energy-saving Technology (China Electric Power Research Institute), Haidian District, Beijing 100192, China; 2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: The energy hub is one of the key technologies under the umbrella concept of energy internet. The energy hub topology and its control scheme will closely affect the flexible operation of future grids in terms of conversion and renewable integration. An AC/DC hybrid electric energy hub was proposed with a modular structure and isolation on the line-frequency AC side. Using the hub, the low voltage AC and DC distribution networks, renewable energy sources, energy storage devices and loads can be easily integrated into the utility system. A virtual-machine-based control strategy was presented for the energy hub to emulate the machine inertia and damping, improving its stability. Based on the study using established models and a virtual-machine-based control scheme, a small-signal model and power sharing scheme of the energy hub were proposed. Finally, focusing on a typical energy hub system, the validity and effectiveness of the proposed topology and control strategy are verified by using PSCAD/EMTDC. The proposed model and analysis approach can be useful in future energy internet and energy hub development.

KEY WORDS: energy internet; energy hub; virtual synchronous machine; virtual DC machine; small-signal model

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2014DFG72620); 国家电网公司科技项目(PD71-15-038); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(106112015CDJXY150005, CDJZR12150074)。

The State & International Science and Technology Cooperation Project (2014DFG72620); Science and Technology Project of SGCC (PD71-15-038); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (106112015CDJXY150005, CDJZR12150074).

摘要: 能量路由器是能源互联网的关键技术之一,其电路拓扑和运行控制与可再生能源接纳、灵活电力变换息息相关。与传统基于固态变压器的能量路由器不同,文中提出一种交直流混合、工频隔离、交直流模块化的能量路由器电路,便于低压交直流配电网接入、负荷供电、可再生能源和储能等分布式电源消纳。在此基础上,基于虚拟电机理论,还提出该能量路由器的控制策略,交流侧接口采用虚拟同步电机控制,直流侧接口采用虚拟直流电机控制,以增强系统惯性和阻尼,提升系统稳定性。然后,建立了虚拟电机控制的数学模型,分析其小信号模型和功率分配特性。最后,针对一个典型的能量路由器系统,利用 PSCAD/EMTDC 的仿真结果验证了所提电路拓扑和控制策略的正确性和有效性,为能量路由器和能源互联网的研究提供了一种新的模型和方法。

关键词: 能源互联网; 能量路由器; 虚拟同步电机; 虚拟直流电机; 小信号模型

0 引言

为了更好地将可再生能源接入电网,近年来,综合了网络能源技术的能源互联网概念得到了广泛的关注^[1-2]。然而,要实现能源互联网,还面临着诸多技术挑战^[3],其中能量路由器作为能源互联网的关键装备,直接关系到可再生能源的消纳、电能的灵活高效变换,因此其电路拓扑和运行控制具有重要的研究价值和应用前景^[4]。

现有关于能量路由器的研究主要集中在:基于高频变压器和功率器件的固态变压器(或称电力电子变压器方面)^[4-6],其面向的应用对象主要是中高

压交流配电网。欧盟 UNIFLEX-PM(Advanced Power Converters for Universal and Flexible Power Management in Future Electricity Networks)项目对固态变压器的概念进行了深入研究^[7-8]。美国 FREEDM(Future Renewable Electric Energy Delivery and Management)项目将固态变压器比作未来能源网中的大脑和路由器,并被认为构建未来能源互联网的基本模块^[5,9-11]。瑞士苏黎世联邦理工学院的学者针对能量路由器提出了 MEGALink 的概念,并进行了深入研究^[12-14]。日本在 3·11 大地震和核泄漏的灾难之后,成立了“数字电网联盟”,提倡“数字电网”,其核心即利用“数字电网上路由器”(电力路由器)统筹管理和调度一定区域范围内的电力^[15-16]。国内的华中科技大学在固态变压器概念的基础上提出了电子电力变压器的概念,并进行了深入研究^[17-19],清华大学提出了一种适用于柔性直流配电网的高频链直流固态变压器^[20]。综上,现有关于能量路由器的概念还主要停留在交流配电网的框架内。可再生能源是能源互联网的重要源泉,然而,风能和光伏等可再生能源多以直流输出;而且,用户侧的负荷也越来越多地采用直流供电。此外,电网和负荷要求能量路由器能够满足不同输入输出的需求,应该更多地兼顾直流电源和直流负荷的供用电需求^[21-23],在电路拓扑上应该具有更多的兼容性和扩展能力;在控制策略上,应该具有更多的柔韧性和灵活性,能兼顾更多的弹性和稳定控制能力。

本文提出一种能量路由器电路,对于交流接口,采用单相组式逆变器的电路结构,降低交直流电压应力,并兼顾模块化和成组运行的能力;对于直流接口,采用双向 Buck-Boost 电路模块,增强可再生能源、储能和负荷的接纳能力。此外,还提出了相应的控制策略,采用统一的虚拟电机控制技术,交直流接口分别采用虚拟同步电机和虚拟直流电机的控制策略,有效地提升能量路由器的惯性和阻尼,增强系统的稳定运行能力和功率分配能力。仿真结果验证了所提能量路由器电路及其虚拟电机控制策略的正确性和有效性,为能量路由器的研究提供了一条新的有效途径。

1 一种能量路由器的电路拓扑

本文提出的能量路由器如图 1 所示,以有效地实现电网、可再生能源、负荷的高效紧凑衔接。

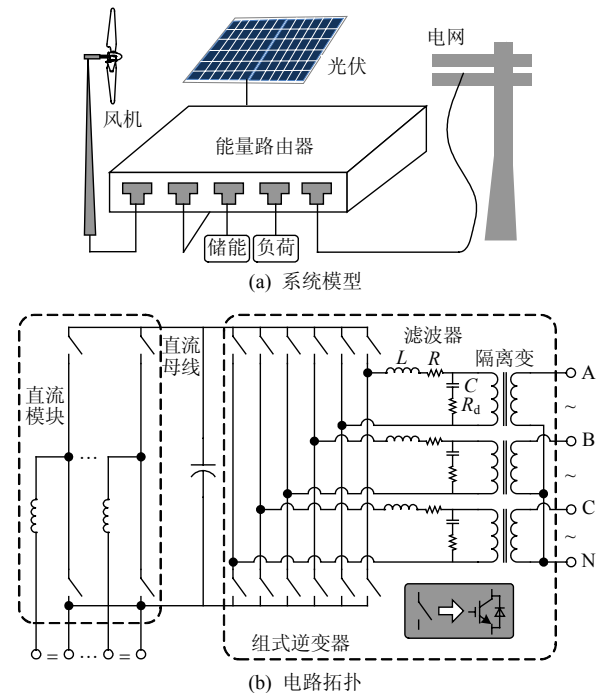


图 1 一个能量路由器的结构

Fig. 1 Configuration of an energy hub

能量路由器的交流侧采用组式逆变器电路,实现直流母线与交流母线的接口,电网交流电压 380 V,直流母线电压选为 400 V,采用组式逆变器接口可以有效地弥补传统 Boost 型整流器输出直流母线电压过高、电压应力大的不足,还可以无缝地接入 400 V 低压直流配电网。此外,在交流侧组式逆变器结构中,三相相互独立,其模块化的结构便于接入三相三线或四线、单相两线或三线的低压配电网。

能量路由器的直流侧采用半桥电路模块,根据电源和负荷的不同,可以灵活工作于 Boost、Buck 和双向 Buck-Boost 三种不同的模式。对于光伏和风机应用,工作于 Boost 模式,将可再生能源输出的直流电压泵升到逆变器直流母线电压所需的水平。对于直流负荷应用,根据不同的供电电压要求,工作于 Buck 或 Boost 模式,实现对直流负荷的灵活供电。对于储能应用,工作于双向 Buck-Boost 模式,灵活地实现直流母线与储能单元之间的能量流控制。

2 虚拟电机控制策略

2.1 交流接口虚拟同步电机控制

在图 1 所提出的能量路由器电路中,交流电网接口采用虚拟同步电机控制^[24],如图 2 所示,其目的是将其在外特性上等效为同步发电机或电动机,

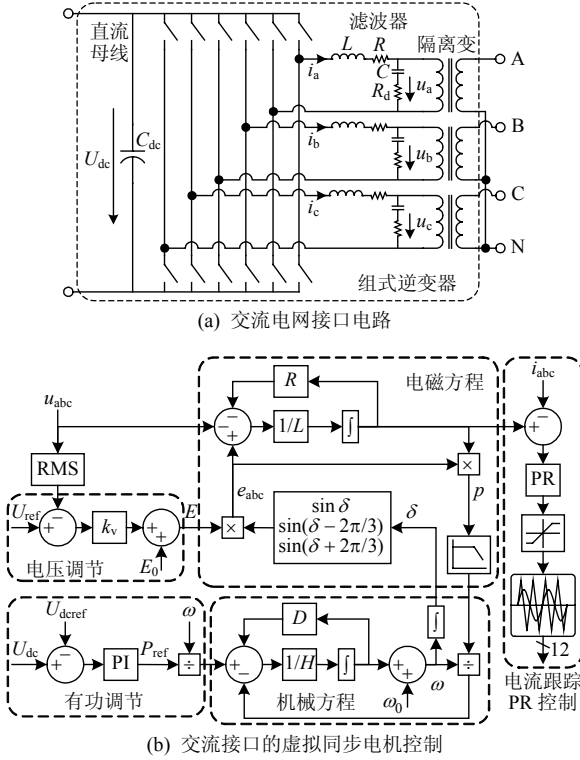


图 2 电网交流接口的电路及其虚拟同步电机控制
Fig. 2 Configuration and control scheme of virtual synchronous machine for AC interface

提升其与电网连接的柔性，降低对电网的冲击，增强电网电压和频率的稳定性。

一般地，虚拟同步电机的数学模型可以利用机械方程和电磁方程来描述。首先，考虑其机械部分的方程：

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega \\ H\dot{\omega} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \end{cases} \quad (1)$$

式中： H 为同步发电机的惯性时间常数； ω 为同步发电机的角速度； ω_0 为电网同步角速度； T_m 和 T_e 分别为同步电机的机械和电磁转矩； D 为阻尼系数。发电机的输出电磁转矩 T_e 可以由其电势 e_{abc} 和其输出电流 i_{abc} 计算得到，即：

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

然后，考虑虚拟同步电机的电磁方程。由图 2(a)可知，并网电流 i_{abc} 的动态方程满足：

$$L\dot{i}_{abc} = e_{abc} - u_{abc} - Ri_{abc} \quad (3)$$

式中： u_{abc} 为虚拟同步发电机的机端电压； L 和 R 分别为滤波电感及其寄生电阻。

值得指出的是：虚拟同步电机通过直接控制 i_{abc} 来控制并网功率，也可以通过控制 e_{abc} 来间接控

制^[25]。研究表明，间接控制具有更好的动态响应性能，但是由于没有直接的并网电流反馈环节，无法保障并网电流的电能质量。因此，为了满足 IEEE 等相关标准对并网电流电能质量的要求，这里采用直接电流控制，在得到给定电势 e_{abc} 的基础上，通过式(3)求取并网电流指令 $i_{ref,abc}$ ，并对输出电流进行跟踪控制。

虚拟机械转矩 T_m 为其转矩指令 T_0 ，可以表示为

$$T_0 = \frac{P_{ref}}{\omega} \quad (4)$$

式中 P_{ref} 为虚拟同步电机的有功指令。交流接口的控制目标在于维持直流母线电压的稳定，如图 2(b)所示，这里的有功指令 P_{ref} 由直流母线电压偏差调节 PI 的输出得到，即：

$$P_{ref} = G_{PI}(s)(U_{dc} - U_{dcref}) \quad (5)$$

式中 U_{dcref} 和 U_{dc} 分别为直流母线电压的指令值和实际值。

传统同步电机通过调节励磁来调节其机端电压及无功输出。类似地，可以通过调节虚拟同步电机模型的虚拟电势 E 来调节机端电压。

虚拟电势指令 E 由两部分组成。其一，是虚拟同步电机的空载电势 E_0 ，表征了其空载离网运行时的额定机端电压。其二，是对应于机端电压调节的部分 ΔE_U ，可以等效为同步发电机的励磁调节器或自动电压调节器(automatic voltage regulator, AVR)，若 AVR 简化为一比例环节，那么 ΔE_U 可以表示为

$$\Delta E_U = k_v(U_{ref} - U) \quad (6)$$

式中： U_{ref} 和 U 分别为虚拟同步电机机端线电压峰值的指令值和真实值； k_v 为电压调节系数。

综上，发电机虚拟电势可以表示为

$$E = E_0 + \Delta E_U \quad (7)$$

进而，可以得到发电机虚拟电势向量：

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E \sin \delta \\ E \sin(\delta - \frac{2\pi}{3}) \\ E \sin(\delta + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

可见，虚拟同步电机在保证无功功率跟踪的同时，还能参与电网电压调节，根据电压的偏差为其接入的电网提供必要的无功支撑。

如图 2 所示，在得到虚拟电势 \mathbf{E} 的情况下，可以利用式(3)，计算出虚拟同步电机的并网电流指

令。在此基础上可以利用比例谐振(proportional resonant, PR)控制器实现电流跟踪控制,完成其对并网电流 i_{abc} 的高精度控制。

2.2 直流接口虚拟直流电机控制

图1所示能量路由器的直流接口采用虚拟直流电机控制,如图3所示,其目的在于增强直流母线电压的惯性和稳定能力^[26-27]。DC/DC变换器可以等效为一个二端口网络,如图3(a)所示。一般地,对于新能源发电用的DC/DC变换器,二端口的 U_1 和 I_1 接到光伏、风机的整流输出端或者储能装置的直流输出端,二端口的 U_2 和 I_2 接到公共的直流母线。经过如图3(b)所示的先进控制策略,可以使得二端口输出端的 U_2 - I_2 的外特性表现出与直流电机相一致的下垂特性和动态特性。

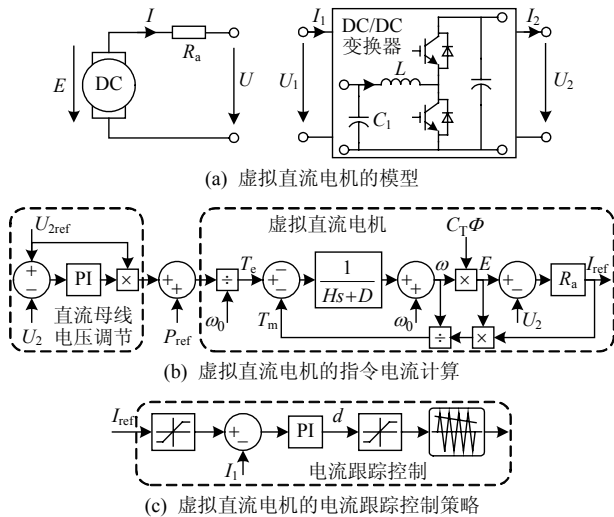


图3 虚拟直流电机及其控制

Fig. 3 Configuration and control scheme of virtual DC machine

如图3所示,直流电机电枢回路的电动势平衡方程为

$$E = U + IR_a \tag{9}$$

式中: E 为直流电机的电枢电动势, $E = C_T \Phi \omega$, 其中 C_T 为转矩系数, Φ 为磁通, ω 为直流电机的机械角速度; U 为机端电压; R_a 为电枢回路总的等效电阻。直流电机的电磁功率为电枢绕组感应电动势 E 与电枢电流 I 的乘积,即 $P = EI$ 。对应地,电磁转矩 T_e 可以写为 $T_e = P/\omega$ 。对于直流发电机,其机械转动方程满足:

$$H\dot{\omega} = T_m - T_e - D(\omega - \omega_0) \tag{10}$$

式中: H 为直流发电机的惯性时间常数; T_e 和 T_m 分别为直流发电机的电磁和机械转矩; D 为发电机

的阻尼; ω_0 为直流电机的额定机械角速度。对于直流电动机,式(10)所示模型相应地改为

$$H\dot{\omega} = T_e - T_m - D(\omega - \omega_0) \tag{11}$$

图3(b)、(c)给出了典型虚拟直流电机的控制策略,其中 U_{2ref} 和 U_{d2} 为直流二端口电路的输出,即是能量路由器的直流母线电压的额定值和实际值, P_{ref} 为指令功率。经过前述虚拟直流电机的数学模型和控制策略,可以得到其指令电流 I_{ref} , 然后经过反馈控制和调制得到功率器件的驱动脉冲。借鉴真实的直流电机^[28], $C_T \Phi$ 取为 5.1, 控制参数中的惯性时间常数 H 和阻尼 D 应该根据所接入的直流电源和负荷的动态响应时间来选择。

为了给直流母线电压高于 400 V 的负荷供电,需要采用一个如图4(a)所示的 Boost 电路接口,其控制框图如图4(b)、(c)所示,电路的输入端 U_{dc} 接入 400 V 直流母线。对于低于 400 V 的负荷,采用 Buck 电路,依据与图4类似的方法,得到相应的结果。值得指出的是,这里负荷的负荷功率指令由维持负荷端电压和能量路由器直流母线电压两部分共同组成,维持直流母线电压 U_{dc} 稳定部分用于参与需求响应调节,支撑直流母线电压的稳定。

储能用 DC-DC 双向变流器,采用 Buck-Boost 双向变流器。变流器电路如图5(a)所示,其控制框图如图5(b)、(c)所示。根据储能单元的动态响应速度,设置不同的惯性时间常数 H 。超级电容的响应时间为毫秒级而蓄电池的响应时间为秒级,例如超级电容和蓄电池变换器中的 H 可以分别选为 $H =$

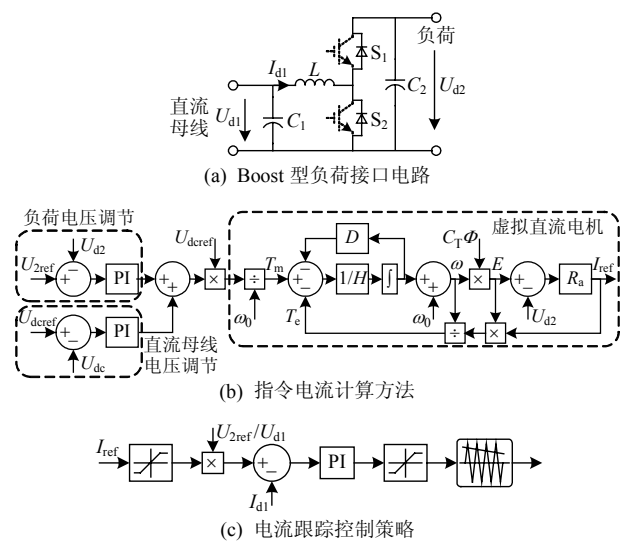


图4 Boost型负荷接口及其控制

Fig. 4 Configuration and control scheme of boost-based load interface

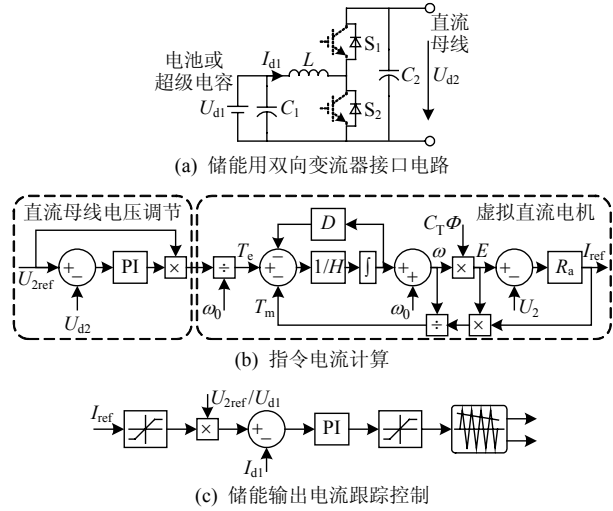


图 5 储能双向变流器接口及其控制

Fig. 5 Configuration and control scheme of interface for energy storage device

250 ms 和 $H=2$ s。阻尼参数 D 决定了其功率分配的比例，将在 2.3 节中详细讨论。需要指出的是，和前面的控制策略不同，这里计算得到的指令电流 I_{ref} 为高压侧的值，假设变换器的效率为 100%，低压侧输入能量与高压侧输出能量相等，那么低压侧指令电流 $I_{1ref} = U_{2ref}I_{ref}/U_{d1}$ 。

2.3 小信号分析与功率分配模型

基于图 2、3 所示的虚拟同步电机和虚拟直流电机控制策略，可以得到如图 6(a)所示的能量路由器的小信号模型，下面将做定量分析。

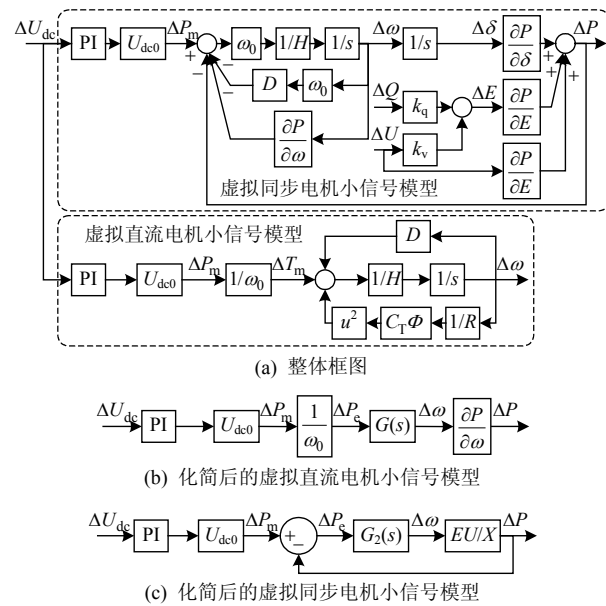


图 6 能量路由器的小信号模型

Fig. 6 Small-signal model of the energy hub

如图 3 所示，虚拟直流电机的输出功率可以表示为

$$P = \frac{E-U}{R} E \quad (12)$$

而 $E = C_T \Phi \omega$ ，那么：

$$P = \frac{C_T \Phi \omega - U}{R} C_T \Phi \omega = \frac{(C_T \Phi \omega)^2}{R} - \frac{U C_T \Phi \omega}{R} \quad (13)$$

又 $T = P/\omega$ ，那么，转矩可以表示为

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{(C_T \Phi)^2 \omega}{R} - \frac{U C_T \Phi}{R} \quad (14)$$

进而可得角速度偏差与电磁转矩偏差之间的传递函数为

$$\frac{\partial T}{\partial \omega} = \frac{(C_T \Phi)^2}{R} \quad (15)$$

由图 6(a)可以得到虚拟直流电机的小信号模型如图 6(b)所示，其中传递函数 $G(s)$ 可表示为

$$G(s) = \frac{1}{\frac{D + \frac{\partial T}{\partial \omega}}{1 + \frac{\partial T}{\partial \omega} \frac{1}{Hs}}} = \frac{R}{RHs + D(C_T \Phi)^2} \quad (16)$$

进而，可以得到直流母线电压偏差相对于功率调节输出 ΔP 之间的传递函数：

$$G'(s) = \frac{\Delta P}{\Delta U_{dc}} = \frac{U_{dc0}}{\omega_0} G_{PI}(s) G(s) \frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{U_{dc0}}{\omega_0} (k_p + \frac{k_i}{s}) \cdot \frac{R}{RHs + D(C_T \Phi)^2} \left[\frac{2(C_T \Phi)^2 \omega_0}{R} - \frac{U C_T \Phi}{R} \right] \quad (17)$$

由极值定理，可以得到稳态时功率分配系数为

$$G'(s)|_{s=0} = \frac{U_{dc0}}{\omega_0} k_p \frac{R}{D(C_T \Phi)^2} \cdot \left[\frac{2(C_T \Phi)^2 \omega_0}{R} - \frac{U C_T \Phi}{R} \right] \approx \frac{1}{D} \quad (18)$$

因此，参数 D 的选择应该根据变换器和直流电源或负荷的容量来加以选择，一般地，可以借鉴下垂控制中下垂系数的选择方法^[29]，按 $D_1 S_1 = D_2 S_2 = \dots = D_n S_n$ ，来设计各个电源参数中 D 的取值。

虚拟同步电机的小信号模型可以表示为如图 6(c)所示。其中，由图 2 可知，虚拟同步电机与电网交换的功率可以表示为

$$\begin{cases} P = \frac{EU}{Z} \cos(\varphi - \delta) - \frac{U^2}{Z} \cos \varphi \\ Q = \frac{EU}{Z} \sin(\varphi - \delta) - \frac{U^2}{Z} \sin \varphi \end{cases} \quad (19)$$

式中 Z 和 φ 分别为滤波电抗器的阻抗和阻抗角, 可以表示为

$$\begin{cases} Z = \sqrt{(\omega L)^2 + R^2} \\ \varphi = \tan^{-1}\left(\frac{\omega L}{R}\right) \end{cases} \quad (20)$$

进而有, 交换功率的小信号模型为

$$T = \frac{P}{\omega} = \Delta P = \frac{\partial P}{\partial \omega} \Delta \omega + \frac{\partial P}{\partial L} \Delta L + \frac{\partial P}{\partial \delta} \Delta \delta + \frac{\partial P}{\partial E} \Delta E + \frac{\partial P}{\partial U} \Delta U \quad (21)$$

由于滤波器的电抗 $X = \omega L$ 远大于其寄生电阻 R , 式(19)可以简化为

$$\begin{cases} P = \frac{EU}{X} \sin \delta \\ Q = \frac{EU}{X} \cos \delta - \frac{U^2}{X} \end{cases} \quad (22)$$

进而, 式(21)中的小信号摄动参数可以表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial \omega} = \frac{\partial P}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial \omega} = -\frac{EUL}{X^2} \sin \delta \approx 0 \\ \frac{\partial P}{\partial L} = \frac{\partial P}{\partial X} \frac{\partial X}{\partial L} = -\frac{EU\omega}{X^2} \sin \delta \approx 0 \\ \frac{\partial P}{\partial \delta} = \frac{EU}{X} \cos \delta \approx \frac{EU}{X} \\ \frac{\partial P}{\partial E} = \frac{U}{X} \sin \delta \approx 0 \\ \frac{\partial P}{\partial U} = \frac{E}{X} \sin \delta \approx 0 \end{cases} \quad (23)$$

进而, 可以得到偏差功率 ΔP_e 对角速度偏差 $\Delta \omega$ 的传递函数:

$$G_2(s) = \frac{\Delta \omega}{\Delta P_e} = \frac{2\pi}{\tau s + \xi} \quad (24)$$

以及角速度偏差 $\Delta \omega$ 与功率 ΔP_m 之间的传递函数:

$$G_3(s) = \frac{\Delta P_m}{\Delta \omega} = \frac{EU(\tau s + \xi)}{Xs(\tau s + \xi) + 2\pi EU} \quad (25)$$

其中, 时间常数为 $\tau = 2\pi H \omega_0$, 阻尼为 $\xi = 2\pi D \omega_0$ 。在稳态情况下, 式(25)可简化为

$$\left. \frac{\Delta P_m}{\Delta \omega} \right|_{s=0} = \frac{\xi}{2\pi} = D \omega_0 \quad (26)$$

由式(26)可得, 在电网频率波动情况下, 虚拟同步电机所承担的有功功率与系统阻尼 D 直接相关, 这就决定了两个交流电网接口在电网频率波动时有功功率的分配情况。

同理, 可以得到直流母线电压偏差 ΔU_{dc} 对于交换功率偏差 ΔP 之间的传递函数为

$$G(s) = \frac{\Delta P}{\Delta U_{dc}} = G_{PI}(s) U_{dc0} \frac{G_2(s) \frac{EU}{X}}{1 + G_2(s) \frac{EU}{X}} = G_{PI}(s) U_{dc0} \frac{2\pi EU}{(\tau s + \xi) X + 2\pi EU} \quad (27)$$

从中不难发现, 稳态功率响应为

$$G(s)|_{s=0} = \frac{\Delta P}{\Delta U_{dc}} \Big|_{s=0} = k_p U_{dc0} \frac{2\pi EU}{\xi + 2\pi EU} \quad (28)$$

可见功率的分配仍与阻尼 D 成反比。

从以上分析结果可以发现, 所提基于虚拟直流电机控制的能量路由器, 可以利用小信号模型分析其直流母线的能量平衡情况, 以及各个变流器之间的功率分配规律。此外, 基于电动机的数学模型, 借鉴电动机的暂态能量函数等方法, 还可以进一步分析所提能量路由器在大扰动情况下适应性, 为能量路由器的建模、分析与控制提供了一条崭新的途径。

3 仿真结果与分析

为了验证所提能量路由器电路及其控制策略的正确性和有效性, 在 PSCAD/EMTDC 平台下搭建了如图 1 所示系统的仿真模型, 参数如表 1 所示。下面给出系统仿真过程中的扰动设置情况: 0 s 时系统启动, 2 s 时光照从 800 W/m^2 阶跃到 1200 W/m^2 ;

表 1 仿真平台的参数

Tab. 1 Key parameters of simulated energy hub

部件	变量及取值
电网	线电压有效值 $U=380 \text{ V}$, 频率 $f=50 \text{ Hz}$, 系统电感 $L_g=3 \text{ mH}$
光伏	开路电压和短路电流分别为 342 V 和 16 A ; 参考温度为 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 参考光照强度为 1000 W/m^2 , 仿真中光伏电池板的温度和光照强度分别为 $T=50 \text{ }^\circ\text{C}$ 和 $S=800 \text{ W/m}^2$; Boost 电路开关频率为 10 kHz , 采用扰动观测法实现 MPPT
风机	4 kW 的永磁同步风力发电机, 其输出经不控整流和 Boost 电路接入 400 V 直流母线, Boost 电路的开关频率为 10 kHz
电网接口	LC 滤波器 $L=2 \text{ mH}$, $C=10 \text{ } \mu\text{F}$, $R_d=4 \text{ } \Omega$, 隔离变压器变比 $1:1$; 虚拟同步发电机控制: $k_v=10$, $k_q=10^{-3}$, $H=0.01$, $D=40$
直流负荷	Buck 型负荷, 额定电压 150 V ; Boost 型负荷, 额定电压 450 V ; $H=0.5$, $D=20$, $C_T \Phi=5.1$
混合储能	锂电池变流器控制策略中的惯性和阻尼分别为: $H=2$, $D=20$; 而超级电容变流器的参数为: $H=0.25$, $D=5$; 转矩系数均为 $C_T \Phi=5.1$

4 s 时风速从 6 m/s 阶跃到 5 m/s；6 s 时直流母线投入 100Ω 的电阻负荷。

图 7 给出了能量路由器直流母线电压的动态响应情况，不难发现，除了母线从零电压充电到额定电压时有一定的超调外，系统对于其他诸如负荷投切、风光新能源出力波动等扰动都具有很好的抑制能力，以维持直流母线电压的稳定。

能量路由器的交流电网接口被控制为虚拟同步发电机，其的虚拟机械转矩 T_m 、电磁转矩 T_e 如图 8(a)所示。不难发现：在虚拟同步发电机控制策略作用下，虚拟的电磁转矩能很好地跟踪给定的机械转矩，也即反映了并网变流器良好的有功功率跟踪性能。此外，其虚拟电势 E_p 和虚拟的机械转速 ω 如图 8(b)所示。可以发现：由于变流器从电网吸收有功功率，虚拟同步发电机的虚拟电势 E_p 低于电网电压的峰值 311 V，而虚拟同步发电机的转速能维持在 314 rad/s。其与电网交换电流的波形如图 8(c)

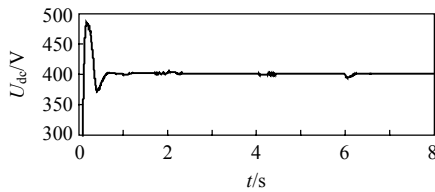
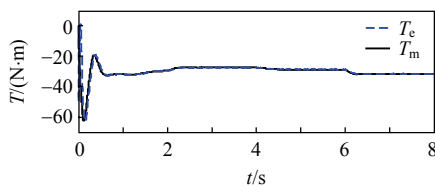
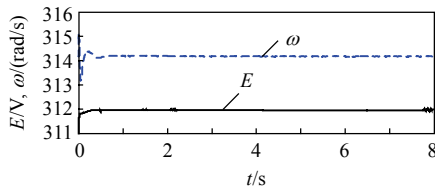


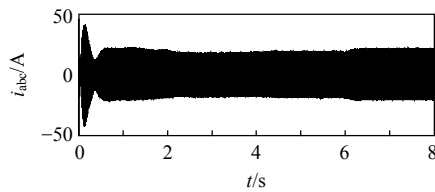
图 7 能量路由器的直流母线电压
Fig. 7 Dc-link voltage of energy hub



(a) 虚拟机械和电磁转矩



(b) 虚拟电势和角速度



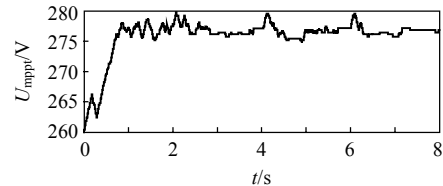
(c) 与电网交换的电流

图 8 虚拟同步电机的特征变量

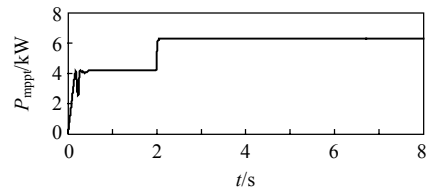
Fig. 8 Characteristic parameters of synchronous machine

所示，可见基本与虚拟电磁转矩的波形相对应，反映各种扰动能量路由器的直流母线对于功率需求的变化。

图 9 给出了光伏电池最大功率跟踪控制的情况，给出了光伏电池板的端电压 U_{mppt} 以及光伏变流器的输出功率 P_{mppt} 。从图 9 不难发现扰动观测法能很好地保证光伏电池板工作在最大功率输出的模式，以实现可再生能源的最大利用。



(a) 光伏电池端电压

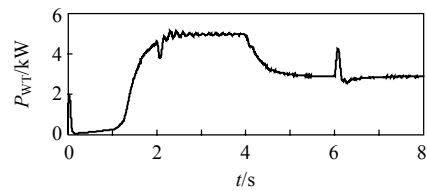


(b) 光伏电池输出功率

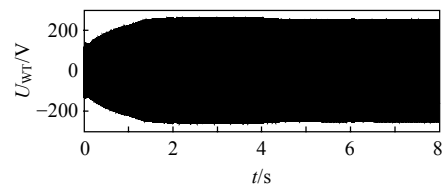
图 9 光伏电池的输出电压和功率

Fig. 9 Voltage and power of PV arrays

图 10 给出了小功率风力永磁同步发电机的动态响应情况。0 s 开机时由于直流母线电压低，发电机开始不断建立机端电压，在直流母线电压达到额定值时，风机逐渐向直流母线馈送直流功率，在风速降低时，PMSG 的机端电压降低，并向电网馈送更少的功率，这个过程的动态和惯性由 PMSG 的惯性决定。同时，也应发现，直流母线电压的扰动对风力发电机的转速和输出功率之间都存在耦合。



(a) PMSG 的输出功率



(b) PMSG 的端电压

图 10 PMSG 的输出电压和功率

Fig. 10 Voltage and power of PMSG

能量路由器中混合储能系统的输出电流指令与其实际值如图 11 所示。变流器都采用虚拟直流发电机的控制策略, 由于两台储能用双向 Buck-Boost 变流器具有不同的惯性时间常数 H 和阻尼系数 D , 使得直流母线电压扰动时, 两台变流器的响应速度和功率分担大小也是不同的。变流器 1 直流母线配置锂电池, 惯性时间常数为 4 s, 阻尼参数为 $D=5$; 变流器 2 直流母线配置超级电容其惯性时间常数为 0.5 s, 阻尼参数为 $D=20$ 。从图 11 不难看出, 变流器 2 具有更快的响应速度。同时, 前面已经证明了变流器功率的分担能力和阻尼参数成反比, 从图 11 不难发现: 变流器的参数 D 较大, 在扰动过程中, 承担更小的功率分担能力。

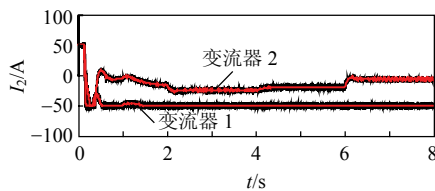


图 11 混合储能系统的指令电流及输出电流

Fig. 11 Current and power of hybrid energy storage devices

图 12 给出了 Buck、Boost 负荷变流器的输出端电压的动态。不难发现, 变流器能很好地维持负荷端电压为额定值, 同时为了响应直流母线电压的扰动, 提升直流母线电压的稳定能力。由于负荷接口变流器采用了虚拟直流电动机控制策略, 在直流母线电压受扰后偏低的情况下, 主动降低负荷电压值, 少向母线取用功率, 有效支撑母线电压的恢复。

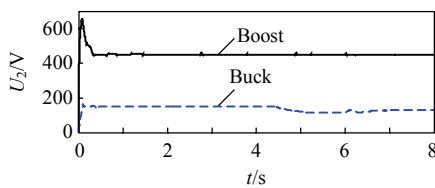


图 12 虚拟直流电机的特征变量

Fig. 12 Characteristic parameters of DC machine

4 结论

能源互联网借助信息互联网技术的思想, 提升能源安全和可再生能源的消纳能力。能量路由器是能源互联网的核心装备之一。有别于传统立足于中压电网的基于固态变压器的能量路由器, 本文提出一种适用于低压交直流混合配电网的能量路由器电路, 并提出了一种基于虚拟电机的控制策略。

利用数学建模、小信号分析和仿真分析的方法验证所提模型和方法的正确性和有效性。可以得到以下结论:

1) 所提的能量路由器电路, 采用模块化的电路结构, 能灵活地适应电网、负荷、可再生能源、储能等多种交直流端口的接入, 可以方便地嵌入未来交直流混合的配电网和能源互联网中;

2) 所提出的基于虚拟电机的能量路由器控制策略, 能够虚拟传统电网中所存在的惯性和阻尼, 提升系统的稳定性。尤其是, 所提出的虚拟直流电机控制策略能有效地实现混合储能单元的能量分配控制, 是有别于传统基于变时间常数控制的另一种有效的混合储能系统的控制方式;

3) 所提基于虚拟电机控制的能量路由器, 交直流单元通过直流母线耦合在一起, 所提出的小信号分析模型和方法能有效地分析该能量路由器的动态功率分配规律。

参考文献

- [1] 刘振亚. 全球能源互联网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015: 1-20.
Liu Zhenya. Global energy internet[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2015: 1-20(in Chinese).
- [2] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命[M]. 北京: 中信出版社, 2012: 1-50.
Jeremy Rifkin. The third industrial revolution[M]. Beijing: China CITIC Press, 2012: 1-50(in Chinese).
- [3] 查亚兵, 张涛, 黄卓, 等. 能源互联网关键技术分析[J]. 中国科学: 信息科学, 2014, 44(6): 702-713.
Zha Yabing, Zhang Tao, Huang Zhuo, et al. Analysis of energy internet key technologies[J]. Science China Information Sciences, 2014, 44(6): 702-713(in Chinese).
- [4] Huang A Q, Crow M L, Heydt G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREED M) system: The energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [5] 曹军威, 孟坤, 王继业, 等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学 信息科学, 2014, 44(6): 714-727.
Cao JunWei, Meng Kun, Wang JiYe, et al. An energy internet and energy routers[J]. Science China Information Sciences, 2014, 44(6): 714-727(in Chinese).
- [6] Sánchez-Squella A, Ortega R, Griño R, et al. Dynamic energy router[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2010, 30(6): 72-80.
- [7] Bifaretti S, Zanchetta P, Watson A, et al. Advanced power

- electronic conversion and control system for universal and flexible power management[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 231-243.
- [8] Almaleki M, Wheeler P, Clare J. Sliding mode observer design for universal flexible power management (Uniflex-PM) structure[C]//Proceedings of the 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics (IECON). Orlando, FL: IEEE, 2008: 3321-3326.
- [9] Zhang J H, Wang W Y, Bhattacharya S. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic[C]//Proceedings of the 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies(ISGT). Washington, DC: IEEE, 2012: 1-8.
- [10] 张明锐, 林显琦, 孙华. 孤岛微网中固态变压器间环流抑制研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5563-5570.
- Zhang Mingrui, Lin Xianqi, Sun Hua. Researches on restraining circulating currents of solid state transformers in islanding mode microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5563-5570(in Chinese).
- [11] 李子欣, 王平, 楚遵方, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2592-2601.
- Li Zixin, Wang Ping, Chu Zunfang, et al. Research on medium-and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2592-2601(in Chinese).
- [12] Guillod T, Huber J E, Ortiz G, et al. Characterization of the voltage and electric field stresses in multi-cell solid-state transformers[C]//Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Pittsburgh, PA: IEEE, 2014: 4726-4734.
- [13] Geidl M, Koeppl G, Favre-Perrod P, et al. Energy hubs for the future[J]. IEEE Power & Energy Magazine, 2007, 5(1): 24-30.
- [14] Schulze M, Friedrich L, Gautschi M. Modeling and optimization of renewables: Applying the energy hub approach[C]//Proceedings of the IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies. Singapore: IEEE, 2008: 83-88.
- [15] Boyd J. An internet-inspired electricity grid[J]. IEEE Spectrum, 2013, 50(1): 12-14.
- [16] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 1-10.
- Cao Junwei, Yang Mingbo, Zhang Dehua, et al. Energy internet: an infrastructure for cyber-energy integration[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 1-10(in Chinese).
- [17] 刘海波, 毛承雄, 陆继明, 等. 配电系统电子电力变压器非线性控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(27): 1-8.
- Liu Haibo, Mao Chengxiong, Lu Jiming, et al. Nonlinear control of electronic power transformer for distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(27): 1-8(in Chinese).
- [18] 王丹, 毛承雄, 陆继明. 自平衡电子电力变压器[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(6): 77-83.
- Wang Dan, Mao Chengxiong, Lu Jiming. Auto-balancing electronic power transformer[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(6): 77-83(in Chinese).
- [19] 毛承雄, 王丹, 范澍, 等. 电子电力变压器[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 1-20.
- Mao Chengxiong, Wang Dan, Fan Shu, et al. Electronic power transformer[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010: 1-20(in Chinese).
- [20] 赵彪, 宋强, 刘文华, 等. 用于柔性直流配电的高频链直流固态变压器[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(25): 4295-4303.
- Zhao Biao, Song Qiang, Liu Wenhua, et al. High-frequency-link DC solid state transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303(in Chinese).
- [21] Planas E, Andreu J, Gárate J I, et al. AC and DC technology in microgrids: A review[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015, 43: 726-749.
- [22] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 9-19.
- Song Qiang, Zhao Biao, Liu Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19(in Chinese).
- [23] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. 直流配电技术综述[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 556-564.
- Cui Fubo, Guo Jianbo, Jing Ping, et al. A review of DC power distribution technology[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 556-564(in Chinese).
- [24] 吕志鹏, 盛万兴, 钟庆昌, 等. 虚拟同步发电机及其在微电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2591-2603.
- Lü Zhipeng, Sheng Wanxing, Zhong Qingchang, et al. Virtual synchronous generator and its applications in micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2591-2603(in Chinese).
- [25] Bevrani H, Ise T, Miura Y. Virtual synchronous

- generators : A survey and new perspectives[J] . International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2014, 54: 244-254.
- [26] Yunjie Gu , Wuhua Li , Xiangning He . Frequency-coordinating virtual impedance for autonomous power management of DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(4): 2328-2337.
- [27] Shamsi P, Fahimi B. Stability assessment of a DC distribution network in a hybrid micro-grid application[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(5): 2527-2534.
- [28] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 2 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005: 43-117.
- Gu Chenglin, Chen Qiaofu, Xiong Yongqian. Electrical machine[M]. Second version. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology Press, 2005: 43-117(in Chinese).
- [29] Zhong Q C, Hornik T. Control of power inverters in renewable energy and smart grid integration[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2012.



盛万兴

收稿日期: 2015-02-28。

作者简介:

盛万兴(1965), 男, 教授级高工, 博士生导师, 研究方向为智能电网、电力系统自动化及电网经济运行;

刘海涛(1978), 男, 高级工程师, 研究方向为配电网运行与控制、微电网;

曾正(1986), 男, 博士, 讲师, 研究方向为分布式发电、并网逆变器、新型电力电子器件, zengerzheng@126.com。

(责任编辑 车德竞)