

DOI: 10.7667/PSPC161900

基于分布式电源的能源路由器设计研究

徐文进, 周桂新

(国网上海市电力公司浦东供电公司, 上海 200122)

摘要: 随着大量的分布式电源接入电力系统中, 逐渐改变着传统电力系统的结构和运行模式。能源互联网作为未来电网发展的必然趋势, 日渐受到政府和专家的重视, 成为了当前的研究热点问题。作为能源互联网关键接口设备, 能源路由器具有统一电能接口和通信接口的特点。设计了一种基于分布式电源的能源路由器结构设计。将能源路由器划分为核心控制通信部分和能量传输部分。主要针对能源路由器的能量传输部分进行了全面分析设计, 通过构建直流交流双母线动态互动的方式来实现供电的高效、稳定和节能的目的。针对能源路由器的电能传输部分进行了建模与仿真。通过仿真结果验证系统的交流侧和直流侧供电稳定性和电能质量满足目前分布式接入和电力系统运行电能质量的要求。

关键词: 能源互联网; 能源路由器; 分布式发电; 交直流母线; 动态互动

Design and research of energy router based on distributed generation

XU Wenjin, ZHOU Guixin

(State Grid Pudong Power Supply Company, SMEPC, Shanghai 200122, China)

Abstract: With a large number of distributed generators connected into the power system, the structure and operation mode of the traditional power system are changed. As an inevitable development trend of future grid, government and experts pay more and more attention to energy internet increasingly. Energy internet system is becoming the current hot issues. As a key interface equipment of energy internet system, energy router has two features, i.e. unified energy transmission interface and unified communication interface. This paper designs a structure of energy router based on distributed power generator resources. It is divided into core control communications part and energy transmission part. This paper carries on the comprehensive analysis and design to energy router's power transmission part, and tries to achieve the purpose of the power supply of high efficiency, stability and energy saving by building DC and AC bus dynamic interactive. The power transmission part of the energy router is modeled and simulated. By analyzing the simulation results, the quality of the AC side and DC side of the energy router system can meet the requirements of power quality.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2015AA050203).

Key words: energy internet; energy router; distributed generation; AC bus and DC bus; dynamic interactive

0 引言

近些年, 随着科技的快速发展, 世界对能源的需求越来越大, 随着化石能源的日渐枯竭以及环境问题的愈演愈烈, 人们逐渐认识到了摆脱化石能源的依赖, 使用可再生能源的重要性^[1]。2014年我国提出了2050年实现可再生能源供给占比60%~70%的发展目标^[2]。目前随着“Internet+”的思维概念贯穿全国各行各业, 将Internet融合多种通信模式, 为

丰富和利用信息提供了极大便利, 能源互联网与可再生能源、分布式发电以及大电网的结合正在日渐改变着中国的生活以及电力行业的发展^[3-4]。目前我国电力运营仍然保持传统的二元结构特点, 电力潮流仍然保持单向运行, 市场对电力的生产、配送及消费相互割裂, 无法满足个性化需求消费的要求。随着大量分布式可再生电源在城市负荷侧的出现, 电网的这一单一、二元的传统特点必将随之改变^[5]。

能源互联网概念的提出将大大适应这一新型电力市场特点, 将电力网络与Internet信息网络进行融合, 能够大大适应满足未来电网的多向、复杂潮

流及市场用户的个性化需求。依据美国国家自然科学基金委支持的 FREEDM 项目对能源互联网的解释, 可理解为能源互联网是一种综合利用先进电力电子技术、信息技术、智能管理技术、分布式能量采集存储技术以及各种负载构成的可实现能量双向流动、对等交换和共享的新型电网结构^[6-8]。结合互联网思维经典的能源互联网由若干个能源局域网相互连接, 每个能源局域网由能量路由器、发电设备、储能设备以及交直流负载组成, 可并网工作, 也可以单一局域网脱网独立运行。其主要具有高可再生资源渗透率、强非线性随即特性、多源大数据通信特性以及多尺度多维度的动态特性 4 大主要关键特征。能源互联网目前急需解决的 6 大关键技术: 先进的储能技术、固态变压器技术、智能能量管理技术、智能故障管理技术、安全可靠高效的通信技术以及灵活多变的电网系统规划分析技术^[6]。

能源路由器作为能源互联网的主要组成部分, 其不仅具备能量交换, 还具备通信、能量管理、故障诊断等综合功能。能源路由器作为大电网、区域局域网以及家庭、小区为单位的微电网的三级电网接口设备需要具备统一的通信接口和能量连接接口。由于我国电网的现状具有较强的耦合性, 稳定控制是我国电网发展能源互联网的首要考虑问题。能源路由器作为三层电网的接口单元需要保证交换能量的电能质量满足整个电网络需求, 能够适当控制保证能量的合理流动和负荷需求, 同时需要智能跳读控制能量的正确安全流动。

本文主要对微电网级别局域网能源路由器进行控制研究, 讨论了能源路由器的构架和组成, 重点对能源路由器内部交直流控制器进行设计及研究。微电网结合市网作为算例, 对能源路由器进行仿真分析, 并对未来能源路由器的发展关键进行展望。

1 能源路由器架构

目前国内外对能源路由器的内部结构设计共同之处在于具备统一的电能质量输出接口和互联网信息接口。由于能源路由器的发展趋势是结合分布式电源的统一区域能源局域网的能量接口层, 所以其内部必须具备针对分布式电源特性的控制回路和一次能量传输回路^[9]。目前城市中常见的分布式电源主要有光伏发电、风力发电、微型燃气轮机以及储能等类型^[10], 因此能源路由器需具备以上各种类型电源的输入接口以及相应的控制回路。能源路由器基本架构如图 1 所示。

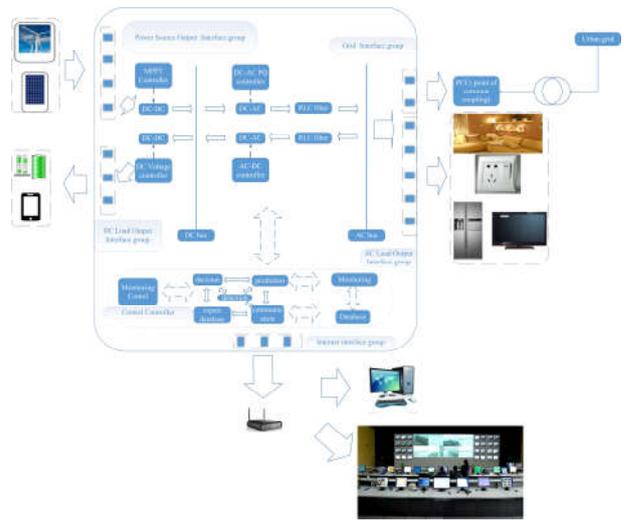


图 1 能源路由器基本架构图

Fig. 1 Basic architecture diagram of energy router

能源路由器可分为 3 部分: 控制部分、能量传输回路和互联网通信单元。目前国内外对能源互联网处于刚刚起步阶段, 大多数工作主要集中在构建能源互联网信息系统, 如文献[11-12]对能源互联网的信息通信关键技术进行了全面的综合性的分析论述, 提出了能源互联网的信息通信体系结构和“三流合一”的概念。目前针对能源路由器的电能传输控制部分研究较少, 文献[13-14]阐述了基于 PCS、ES、PRM 的“能量包”概念, 和能量包的能量传输电路。本文的研究重点将主要集中于能源路由器的能量传输控制部分。

在能源路由器的整体架构中, 对于集成有分布式电源控制特性的能源路由器包含交流、直流母线及单向逆变电路、双向逆变电路、MPPT 控制器和直流电压控制调节器, 可同时为交流负荷和直流负荷供电, 也同时具备能量存储和发电功能。由于传统的分布式发电需要具备多个逆变器并联接入并网节点, 具有物理位置分散和数据采集通信分散的特点。如果上级电网调度中心要进行分布式电源的控制, 需要具备与所有分布式电源逆变器或者现场中央控制器进行通信和调度的条件, 随着分布式电源数量的不断增加和现场中央控制调度系统的完善度大大增加了上级电网对区域内大量分布式电源的管控难度, 同时对通信数据量和信带宽度、通信数据压缩等技术的要求也日益增加。能源路由器作为区域内配网与上级电网并网的中间环节可以很好地解决这一问题。

分布式电源通过能源路由器的分布式电源接口接入能源路由器中, 从而实现即插即用的功能。之

后经过 MPPT 控制模块进行直流母线电压控制, 通过统一的逆变电路将直流电能转换为交流电能输送给交流负荷或上级电网并网, 从而减少了原来传统模式下逆变器的数量。通过直流母线和交流母线中的上行、下行逆变器以及直流负荷侧的电压控制器来动态调控并网接口和负荷接口输出的电能质量, 大大减少了因地理位置分散及传输过程中的能量损耗, 大大提高了能源供应的灵活性和高效性。

2 能源路由器交直流控制方法

2.1 直流侧电源 MPPT 上行控制

传统的逆变电路通常采用 boost 斩压电路通过控制电路晶闸管的通断来进行直流电压控制, 控制器方法通常采用固定电压法(CVT)、扰动观察法(P&O)、电导增量法(INC)及模糊控制法等。由于能源路由器组件采用多组串并联接入直流母线上, 对直流母线的电压控制若仍采用传统的控制方式势必会因为接入组串的不同区域造成直流侧出现环流、无法得到最大功率点, 以及还存在控制器调控延迟、振荡等问题。本文采用先进行直流侧发电模型参数辨识后扰动观察的方法进行精确控制。目前常用光伏组件的类型主要有晶体类硅光伏电池和非晶硅光伏电池, 目前常用光伏电池通用输出电流模型为

$$I = I_{ph} - I_S \left(\exp \frac{U + IR_S}{ATK/q} - 1 \right) - \frac{U + IR_S}{R_p} \quad (1)$$

式中: U 和 I 分别为光伏电池的输出端电压和输出端电流; I_{ph} 为光生电流, 其值正比于光伏电池入射光辐射强度; I_S 为二极管反向饱和电流; R_S 和 R_p 分别为等效串联阻抗和并联阻抗; T 为光伏电池热力学温度, K 和 q 分别为波尔兹曼常数和电荷常量; A 为二极管特性参数。

在实际系统运行中 I_{ph} 、 I_S 、 R_S 、 R_p 和 A 这 5 个描述光伏电池外特性的参数容易受到环境光照强度、温度的影响, 需根据实测太阳能电池的外特性曲线进行参数辨识, 从而重构出光伏电池模型以求得实时最大功率点参考值^[15]。

光伏组件处于最大功率点处时有: $I = I_{mref}$, $U = U_{mref}$, 可得到

$$I_{mref} = I_{ph} - I_S \left(\exp \frac{U_{mref} + I_{mref} R_S}{ATK/q} - 1 \right) - \frac{U_{mref} + I_{mref} R_S}{R_p} \quad (2)$$

从式(2)可以看出当最大功率点时有

$$\frac{dP}{dU} = \frac{d(UI)}{dU} = I_{mref} + U_{mref} \frac{dI}{dU} = 0 \quad (3)$$

式(3)可化简为

$$\frac{dI}{dU} = - \frac{I_{mref}}{U_{mref}} \quad (4)$$

即有

$$\frac{I_{mref}}{U_{mref}} = - \frac{\frac{I_S R_S}{ATK/q} e^{\frac{I_S R_S}{ATK/q}} + \frac{1}{R_p}}{1 + \frac{I_S R_S}{ATK/q} e^{\frac{U_{mref} + I_{mref} R_S}{ATK/q}} + \frac{R_S}{R_p}} \quad (5)$$

从式(5)中代入直流侧光伏组件阵列组串检测到的电流、电压以及外部环境检测数据利用 Newton-Raphson 法可进行接口电路的参数辨识, 从而得到最大功率点处的 I_{mref} 、 U_{mref} 参数, 再利用扰动观察法可进行最大功率点跟踪的结果验证, 详细验证论述方法可参见参考文献[15]。将式(1)和式(5)所述模型引入 MPPT 系统中, 其 MPPT 整体控制流程图如图 2 所示。

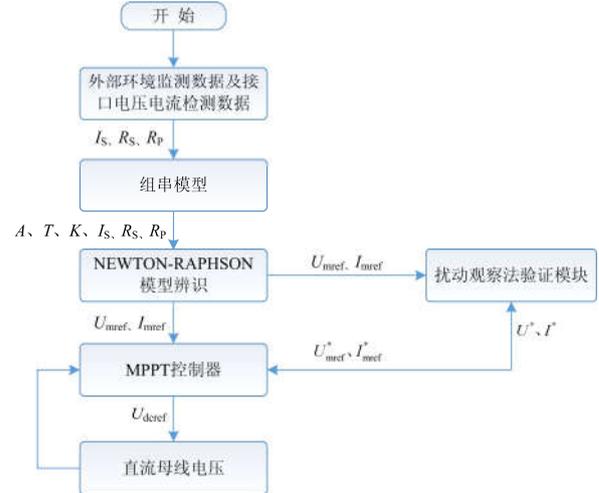


图 2 MPPT 控制系统流程图

Fig. 2 Flow chart of MPPT control system

通过模型辨识和扰动观察法验证后得到的结果即为 U_{dcref} , 通过与实际 DC 母线上电压进行比较后得到的偏差代入 PI 控制器中即可得到控制量 U , 经过 PWM 发生器发出调制信号控制 boost 电路中可控晶闸管的状态即可实现母线电压的控制^[16-17]。MPPT 控制器的控制结构及电路结构如图 3 所示。

图 3 中, U_{dcref} 为直流母线电压设定值, 其值来自于 MPPT 控制器。

与能源路由器直流侧 MPPT 上行控制电路一样, 直流侧下行电压控制也采用 boost DC-DC 斩波电路, 其电压调节控制框图结构见图 3。下行电压控制输出主要用于接入直流负荷和储能单元, 用于为直流负荷供电和通过储能单元调节直流母线和交流母线功率, 从而达到功率平衡的目的。

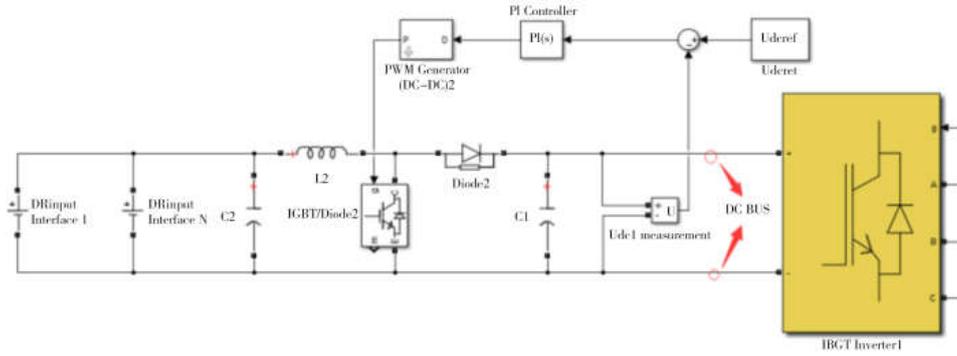


图3 直流侧上行 boost 电路及电压控制器

Fig. 3 DC side upward boost circuit and voltage controller

2.2 交流侧逆变电路控制

通常交流侧由于与电网进行并网, 故无论上行还是下行电路通常采用 IGBT 开关电路阵列和 LCL 滤波电路进行能量传输。控制器方法分别采用 PQ 控制和 VF 控制, 也可同时采用功率下垂控制。为了便于交直流母线动态调控, 在设计时上行采用 PQ 控制结构, 下行采用 VF 控制结构。交流侧接入交流母线端口电压 U_{abc} 经过 abc-dq0 转换后可得到 U_d 、 U_q 从而得到由直流回路送入交流母线的功率如下所示。

$$P = I_q U_d + I_d U_q \quad (6)$$

$$Q = I_d U_d - I_q U_q \quad (7)$$

由式(6)和式(7)可知, 在设定已知功率的情况下可得到

$$I_d^* = \frac{P^*}{U_d} \quad (8)$$

$$I_q^* = -\frac{Q^*}{U_d} \quad (9)$$

电流环控制方程

$$U_d' = \left(k_{pd1} + \frac{k_{id1}}{s} \right) (I_d^* - I_d) - WLI_q + U_d \quad (10)$$

$$U_q' = \left(k_{pd1} + \frac{k_{id1}}{s} \right) (I_q^* - I_q) - WLI_d + U_q \quad (11)$$

交流侧上行逆变电路具体系统控制框图如图 4 所示。

下行逆变电路总体结构上采用与上行逆变电路相似电路, 在原有电流控制环的基础上增加了直流侧母线控制环, 通过检测交流侧母线电压值及电流值进行动态控制, 其原理同上行逆变电路, 原理如下:

$$U_d' = \left(k_{pd3} + \frac{k_{id3}}{s} \right) \left[\left(k_{pd4} + \frac{k_{id4}}{s} \right) (U_{dc}^* - U_{dc}) - I_d \right] - wLI_q + U_d \quad (12)$$

$$U_q' = \left(k_{pd3} + \frac{k_{id3}}{s} \right) I_q + wLI_d + U_q \quad (13)$$

其控制框图如图 5 所示。

2.3 交流直流母线互动稳定控制

能源路由器的一个突出特点是可以通过交直流母线的动态调控进行能量的存储和分配, 从而减少能耗、增加能源的利用率和灵活性。动态调控机制主要是基于能量供需平衡进行的控制, 通过能量分配优化算法进行各接口、各母线的功率分配设定, 通过上行逆变器和下行逆变器的动态控制以及直流母线电压的电压控制器的联动调控进行潮流调度。交直流母线互动互为支撑算法遵循以下原则:

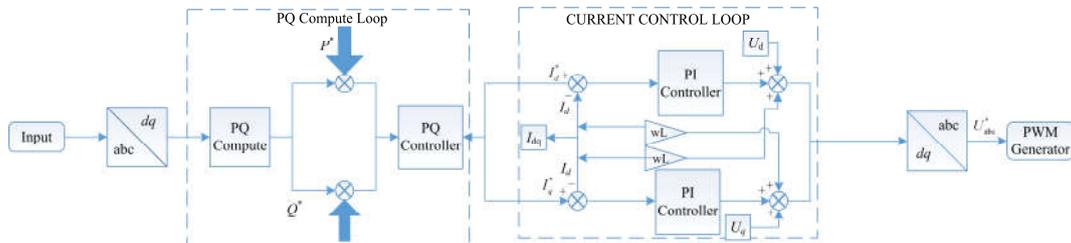


图4 交流侧上行逆变电路 PQ 控制系统框图

Fig. 4 PQ control system diagram of AC side up inverter circuit

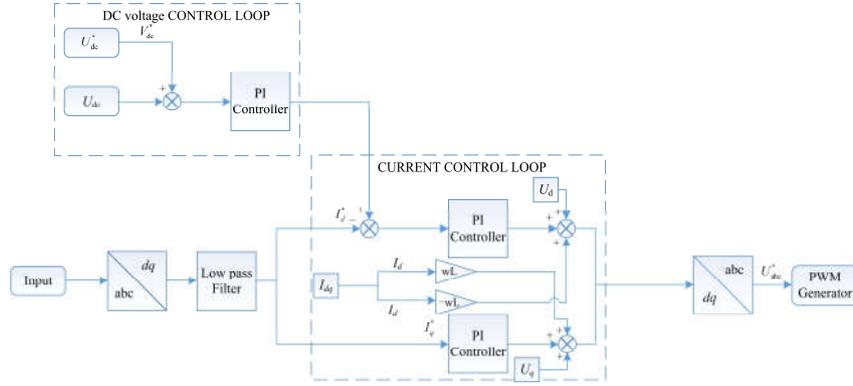


图5 交流侧下行逆变电路直流母线电压控制系统框图

Fig. 5 Diagram of DC bus voltage control system for AC side down inverter

- 1) 直流母线和交流母线总功率供需平衡。
- 2) 在分布式电源具备发电条件的情况下直流侧母线电压以分布式电源最大功率点电压进行发电。
- 3) 当能源路由器接入多个分布式电源时直流侧母线电压由下述经济性优化模型求得。
- 4) 直流侧、交流侧上行输出电压为下行负荷输入电压加上输电线阻损耗电压。
- 5) 当外网故障时切除外部电源接口，通过内部发生器指导上行交流逆变器控制单元为交流负荷供电，储能单元作为备用可在上行和下行电压控制调节电路切换。

6) 为保证最大化利用分布式电源供电，采用储能单元的上下行切换来调控直流母线电压的稳定。

参考文献[18]给出了一种基于微电网的能量供需经济模型，本文在此模型基础上进行改进，从而为交流直流母线动态互动控制直流母线电压提供设定值。

动态互动经济模型目标函数为

$$f(x) = \min \left(\sum w_{iud} + \sum w_{juac} + \sum w_{kdd} + \sum w_{zdac} \right) \quad (14)$$

式中： w_{iud} 表示直流侧上行功率成本即分布式电源发电成本； w_{juac} 为交流侧上行传输成本； w_{kdd} 为直流侧下行负载输出成本； w_{zdac} 为交流侧下行负载输出成本，分别见式(15)~式(18)。

$$w_{iud} = \frac{\sum t C_{wi} P_i(t)}{\sum t P_i(t)} \quad (15)$$

$$w_{juac} = \frac{\sum t C_1 P_j(t) + C_2 P_L(t)}{\sum t P_j(t) + \sum t P_L(t)} \quad (16)$$

$$w_{kdd} = k_k R_k \frac{P_k^2}{U^2} \quad (17)$$

$$w_{zdac} = k_z R_z \frac{(P_z^2 + Q_z^2)}{U^2} \quad (18)$$

模型满足系统最基本的电力约束条件如下。

- 1) 功率平衡约束

直流侧：

$$\sum t P_i(t) - \sum t P_{dcL}(t) - \sum t P_{uac}(t) - \sum t Q_{uac}(t) \pm \sum t P_{da}(t) = 0 \quad (19)$$

交流侧：

$$\sum t P_{uac}(t) + \sum t Q_{uac}(t) - \sum t P_{Lac}(t) - \sum t P_{dac}(t) - \sum t Q_{dac}(t) \pm \sum t P_g(t) = 0 \quad (20)$$

- 2) 电压约束平衡

交流侧母线电压：

$$0.9U_{ac}^* \leq U_{ac} \leq 1.1U_{ac}^* \quad (21)$$

直流侧母线电压 U_{dc} 为 $\max \frac{P_i}{\sum P_i}$ 所对应的第 i

个接口接入分布式电源的最大功率点电压。

- 3) 电流约束平衡

直流侧母线：

$$\sum I_{udcr} - \sum I_{ddl k} \pm I_B - \sum I_{upac} + \sum I_{dpac} = 0 \quad (22)$$

交流侧母线：

$$\sum I_{uacj} - \sum I_{Lac} \pm \sum I_g - \sum I_{dac} = 0 \quad (23)$$

电池寿命约束：

$$P_{B-MIN} \leq P_B \leq P_{B-MAX} \quad (24)$$

依据模型采用常用的 PSO 方法、单纯型法均可求得最终各个接口输入输出的最佳分配方案，通过控制交直流母线上各节点电压来改变能量路由器内部电路潮流走向和各节点输入输出电流大小。

3 算例仿真

本文采用图 6 所示电路架构搭建仿真模型，其中 DG 模块内部结构如图 7 所示，上行和下行 inverter 模块内部结构如图 8 所示，仿真环境采用

win10 64 位操作系统, Matlab 2014 版软件中 simpowersystems 软件包进行仿真。整体模型仿真电路如图 6 所示。仿真主要参数如表 1 所示。

在表 1 中, K_1 、 K_2 为直流侧 PI 控制器的比例

系数, I_1 、 I_2 为直流侧 PI 控制器的积分系数。 P_3 、 P_4 、 P_5 、 P_6 为交流侧 PI 控制器的比例系数, K_3 、 K_4 、 K_5 、 K_6 为交流侧 PI 控制器的积分系数, R 为组件电池串联阻抗。

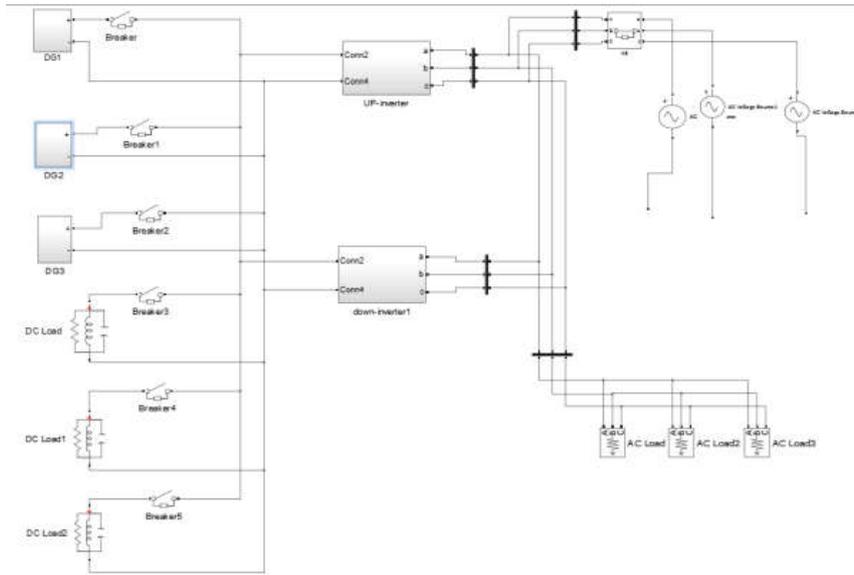


图 6 算例仿真整体电路图

Fig. 6 Example simulation of the overall circuit

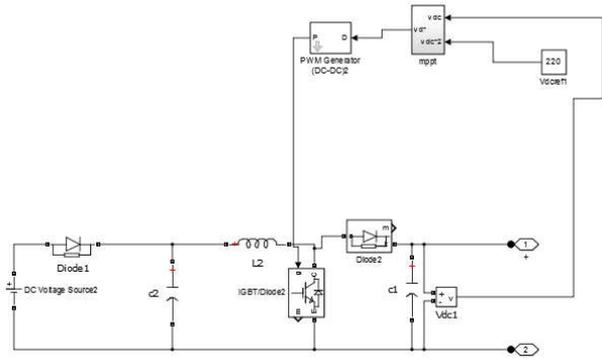


图 7 仿真电路直流侧 DG 内部结构图

Fig. 7 Internal structure of DC side DG of simulation circuit

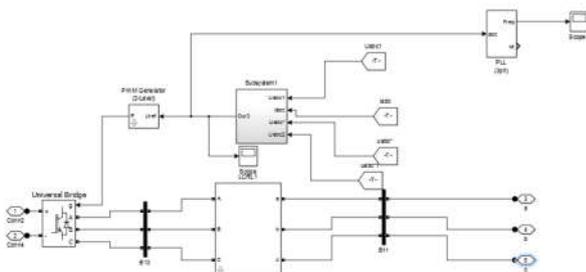


图 8 仿真电路交流侧 inverter 模块内部结构图

Fig. 8 Internal structure diagram of simulation circuit AC side inverter module

表 1 仿真模型主要参数表

Table 1 Main parameters of simulation model

直流侧	K_1	I_1	K_2	I_2	R	稳压电容 C
	0.35	0.75	0.35	0.75	5 Ω	697 μF
交流侧	P_3	K_3	P_4	K_4	P_5	K_5
	0.5	20	0.5	20	0.5	1
	P_6	K_6	滤波电感 L	滤波电容 C	负荷 P	负荷 Q
	0.5	1	28 mH	362 μF	13 kW	0 kW

1) 直流侧母线仿真结果

系统运行至 0.5 s 时由于负荷变化的原因进行交流侧直流侧互动, 重新调整直流母线电压以及最大功率点, 直流母线电压仿真结果如图 9 所示。

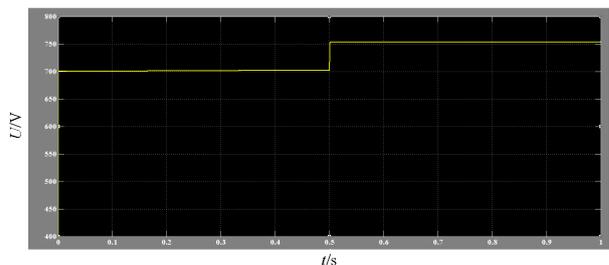


图 9 仿真电路直流侧母线电压仿真结果

Fig. 9 Simulation results of DC side bus voltage of simulation circuit

从图 9 中可以看出直流侧母线电压仿真结果较为稳定, 母线电压调整时间较为迅速, 由于采用 PI 控制器进行控制调整, 所以调整结果会存在稳态误差从而导致仿真结果中直流母线电压曲线不够平滑, 存在一定振荡的情况。针对这一问题可通过优化 PI 参数, 采用 PI 控制器工程经验公式进行改进。

2) 交流侧母线仿真结果

系统运行至 0.5 s 时系统负荷发生变化由原本 13 kW 有功变为 16 kW 有功功率, 系统运行交流侧母线电压电流仿真结果如图 10 所示。

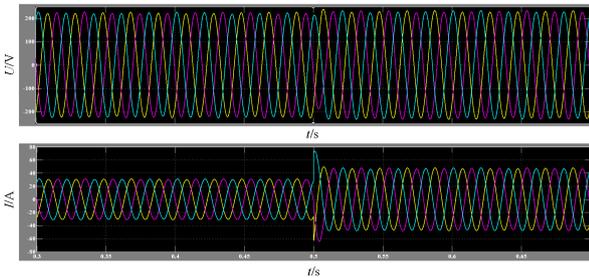


图 10 仿真电路交流侧母线电压电流仿真结果
Fig. 10 Simulation results of AC side bus voltage and current in simulation circuit

从图 10 可以看出, 系统在 0.5 s 时由于负荷变化, 直流母线交流母线互动调控后的仿真结果看出母线电压未发生较大变化, 在 0.5 s 时调控过程相对缓和, 电流变化较大, 但整体调整时间相对较短, 调整过程较为迅速。

3) 交流侧上行逆变输出母线频率

图 11 所示为系统交流母线电压频率仿真结果图, 从图 11 可以看出, 在 0.5 s 时系统频率并未出现大的波动, 总体频率控制较为稳定。

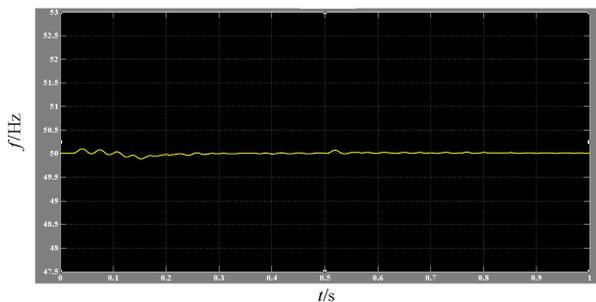


图 11 仿真电路交流侧母线电压频率仿真结果
Fig. 11 Simulation results of simulation circuit AC side bus voltage frequency

4) 系统输出有功功率无功功率

图 12 所示为能量路由器的输出接口输出有功功率与无功功率仿真结果图。从图 12 可以看出在 0.5 s 时系统有功功率由原来的 13 kW 变化调整为

16 kW, 无功功率在 0.5 s 时出现较大波动后恢复至 0 kW 输出, 随后趋于稳定。从图 12 中可以看出, 系统的有功功率输出具有明显波动, 这主要由于系统中直流侧电压具有振荡波动特性以及交流侧逆变过程也存在稳态误差从而导致系统的输出接口处功率存在波动的情况。要想改善这一情况需对全局所有 PI 控制器参数进行优化处理。

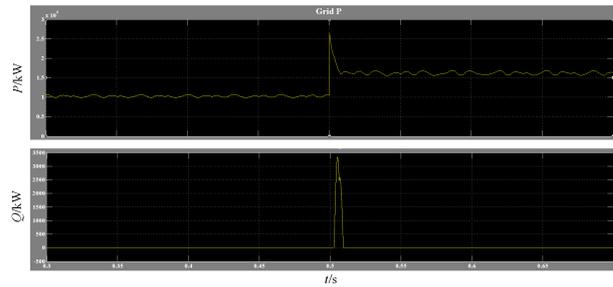


图 12 仿真电路交流侧接口输出有功功率、无功功率仿真结果

Fig. 12 Simulation results of active power and reactive power output of AC side interface of simulation

4 结论

本文提出设计了能源路由器的整体架构, 并对能源路由器的能量传输部分进行了理论设计和仿真验证, 最终得到了交流侧母线电压电流仿真结果、交流母线电压频率结果、直流母线电压结果以及能源路由器接口输出有功功率和无功功率结果。通过对上述结果的研究发现, 由于系统直流侧上下行电压控制器采用了 PI 控制器以及上下行逆变电路中控制器采用 PI 控制器的缘故, 系统存在控制量稳态误差, 输出结果具有明显小幅波动的情况, 而改进这一问题的方式可以采用优化算法对能源路由器全局 PI 控制器参数进行优化、采用 PI 工程经验控制器或者采用多模型预测等精确模型先进控制器替代传统 PI 控制器进行控制。最终仿真结果表明, 本文所提出设计的能源路由器能量传输部分较为稳定, 满足供电电能质量需求。当然本文仍然存在诸多改进问题, 本文未来需要进行的工作是将本文内容继续与控制 and 互联网通信部分进行深入研究和融合。

参考文献

[1] 刘振国, 胡亚平, 陈炯聪, 等. 基于双层优化的微电网系统规划设计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 124-133.
LIU Zhenguo, HU Yaping, CHEN Jiongcong, et al. A planning and design method for microgrid based on two-stage optimization[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 124-133.

- [2] 王丽彬, 李春晖, 王佳伟, 等. 分布式电源及微网对中压配电网接线模式影响[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(12): 106-112.
WANG Libin, LI Chunhui, WANG Jiawei, et al. Influence of distributed generation and microgrid on medium voltage distribution network connection modes[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(12): 106-112.
- [3] KESHAV S, ROSENBERG C. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid[J]. ACM SIGCOMM Computer Communication Review, 2011, 41(1): 109.
- [4] GLOWACKI-DUDKA M. Book review: the third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[J]. Adult Learning, 2012, 24(1): 50-51.
- [5] 吴立杰, 陈星莺, 徐石明, 等. 考虑电流保护可靠性的分布式电源准入容量研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(3): 35-39.
WU Lijie, CHEN Xingying, XU Shiming, et al. Calculating the maximum penetration capacity of distributed generation considering current protection[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(3): 35-39.
- [6] 张跃, 杨汾艳, 曾杰, 等. 主动配电网的分布式电源优化规划方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 67-72.
ZHANG Yue, YANG Fenyan, ZENG Jie, et al. Research of distributed generation optimization planning for active distributed network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 67-72.
- [7] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [8] ZHA Y B, ZHANG T, TAN S R, et al. Understanding and thinking of the energy internet[J]. Nat Defense Sci Technol, 2012, 33: 1-6.
- [9] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(15): 1-11.
DONG Zhaoyang, ZHAO Junhua, WEN Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11.
- [10] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.
WANG Chengshan, WANG Dan, ZHOU Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9.
- [11] 王继业, 郭经红, 曹军威, 等. 能源互联网信息通信关键技术综述[J]. 智能电网, 2015, 3(6): 473-485.
WANG Jiye, GUO Jinghong, CAO Junwei, et al. Review on information and communication key technologies of energy internet[J]. Smart Grid, 2015, 3(6): 473-485.
- [12] 钟诚, 魏来, 严干贵, 等. 考虑非计划孤岛的分布式电源无缝切换控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(9): 129-139.
ZHONG Cheng, WEI Lai, YAN Gangui, et al. A seamless transfer control strategy of distributed generation with considering unintentional islands[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(9): 129-139.
- [13] 施泉生, 郭良合, 张孝君. 综合考虑多主体经济效益的分布式电源优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 85-91.
SHI Quansheng, GUO Lianghe, ZHANG Xiaojun. Research on optimal configuration of distributed generation considering economic benefits of the multi-agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 85-91.
- [14] 鞠平, 吴峰, 金宇清. 可再生能源发电系统的建模与控制[M]. 北京: 科学出版社, 2016.
- [15] 汪隆君, 郭俊宏, 王钢, 等. 主动配电网孤岛划分的混合整数规划模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(15): 136-146.
WANG Longjun, GUO Junhong, WANG Gang, et al. A mixed integer programming model for islanding partition of active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 136-146.
- [16] 刘闯, 潘岱栋, 蔡国伟, 等. 适合低压配电网分布式发电的抗谐波干扰型增强锁相环路技术[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 185-192.
LIU Chuang, PAN Daidong, CAI Guowei, et al. Enhanced phased-locked loop technology with anti harmonic interference capability for distributed generation in low-voltage distribution[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 185-192.
- [17] 范晓龙, 何健, 刘汇川, 等. 含多类型分布式电源的主动配电网三相潮流计算[J]. 陕西电力, 2016, 44(12): 11-17.
FAN Xiaolong, HE Jian, LIU Huichuan, et al. Three-phase power flow computation for active distribution networks with different types of distribution generations[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(12): 11-17.
- [18] 董润楠, 曹剑馨, 梁庚. 基于有色 Petri 网的微电网被动式孤岛控制方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(12): 16-21, 29.
DONG Runnan, CAO Jianxin, LIANG Geng. Studies on the control method for the passive islanding of the microgrid based on colored Petri net[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(12): 16-21, 29.

收稿日期: 2016-11-15; 修回日期: 2017-05-18

作者简介:

徐文进(1977—), 男, 本科, 从事电网规划工作. E-mail: 499909619@qq.com

(编辑 周金梅)