

引用格式:周杰,庞营,王雷,等.智能公寓新型无线电能路由器的能量传输与电能质量控制方法[J].电力科学与技术学报,2025,40(1):211-220.

Citation: ZHU Chen, WANG Mingxi, ZHANG Yang, et al. An energy transmission and power quality control method of a novel wireless energy router for smart apartments[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 211-220.

# 智能公寓新型无线电能路由器的能量传输与 电能质量控制方法

周杰<sup>1</sup>, 庞营<sup>2,3</sup>, 王雷<sup>4</sup>, 徐文<sup>1</sup>, 郑涛涛<sup>1</sup>, 李游<sup>5</sup>, 夏晨阳<sup>6</sup>

(1.安徽铜冠铜箔集团股份有限公司,安徽合肥 230000;2.吉林大学地球信息探测仪器教育部重点实验室,吉林长春 130000;

3.吉林大学仪器科学与电气工程学院,吉林长春 130000;4.湖南大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410082;

5.国网湖南省电力有限公司超高压变电公司,湖南长沙 410004;6.中国矿业大学电气工程学院,江苏徐州 221116)

**摘要:**随着电动汽车、光伏发电等越来越多的新型电网交互型设备接入楼宇,以往的楼宇变电站难以处理复杂的能量流动,导致能量传递效率降低、接口复杂化和电能质量变差的现象。为此,提出一种无线电能路由器与电能质量控制方法。首先,为设计高效的能量流动控制方法,提出无线电能路由器构成的等效模型;其次,为了在所有负载、电能质量情况中保持高效的能量流动,对不同负载、电能质量情况进行分类并给出相应的控制参考量;随后,基于所有分类的控制参考量,设计对不同负载、电能质量情况下的功率控制方法;最后,为验证所提结构和控制方法的可行性,设计相对应情况的仿真案例。所提无线电能路由器可以为楼宇提供一种统一接入电网交互型设备的解决方案,具有重要的工程意义。

**关键词:**无线电能传输;电能质量补偿;电能路由器;变流器控制

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2025.01.022 中图分类号: TM7 文章编号: 1673-9140(2025)01-0211-10

## An energy transmission and power quality control method of a novel wireless energy router for smart apartments

ZHOU Jie<sup>1</sup>, PANG Ying<sup>2,3</sup>, WANG Lei<sup>4</sup>, XU Wen<sup>1</sup>, ZHENG Taotao<sup>1</sup>, LI You<sup>5</sup>, XIA Chenyang<sup>6</sup>

(1. Anhui Tongguan Copper Foil Group Co., Ltd., Hefei 230000, China; 2. Key Laboratory of Geophysical Exploration Equipment Ministry of Education of China (Jilin University), Changchun 130000, China; 3. College of Instrumentation & Electrical Engineering, Jilin University,

Changchun 130000, China; 4. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

5. Extra High Voltage Substation Company, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410004, China;

6. School of Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

**Abstract:** As more new grid-interactive devices, such as electric vehicles and photovoltaic cells, are gradually being connected to buildings, it is difficult for previous building substations to manage this complex energy flow. This results in reduced energy transfer efficiency, complexity of interfaces, and deterioration of power quality. To address this issue, a wireless energy router with a power quality control method is proposed. First, an equivalent model of a wireless energy router is proposed to design an efficient energy flow control method. Second, situations with varying loads and power quality are categorized, and their corresponding control reference values are given to ensure an efficient energy flow. Based on the control reference values, power control methods for situations with varying loads and power quality are designed. Finally, simulations that correspond to each situation are designed to verify the feasibility of the proposed structure and control method. Results show that the proposed wireless energy router can provide a unified solution for buildings' access to grid-interactive devices, which holds significant engineering importance.

**Key words:** wireless energy transmission; power quality compensation; energy router; converter control

收稿日期: 2024-07-03; 修回日期: 2024-09-03

基金项目: 吉林省自然科学基金(20240602061RC); 中国博士后科学基金(2023TQ0132)

通信作者: 庞营(1992—), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事新能源并网装备研究; E-mail: pangying@jlu.edu.cn

近年来,随着电动汽车(electric vehicle, EV)、无线充电技术及分布式发电装置的发展和普及<sup>[1-2]</sup>,大量EV、无线充电设备和分布式发电装置被安装在居民楼宇中。这就要求居民楼宇中的旧电路必须进行相应的改变,以适应此类新型负载、发电设备的加入所带来的挑战。由此,智能楼宇的概念于近年来被提出,其电路结构已经从原有的交流源—交流负载转变为有/无线充电电动车、分布式发电,以及交流、直流负载接入的交直流混合复杂系统<sup>[3-4]</sup>。EV、无线充电设备和分布式发电装置等在为智能楼宇中的住户带来方便的同时,也会对楼宇的供电系统带来许多新的挑战,这些挑战主要体现在以下3个方面。

1) 电能质量问题日益凸显。在实际的三相电网系统中,非线性负载的运行会不可避免地产生电能质量问题,比如低功率因数、谐波污染及三相不平衡等等;电能质量问题不仅增加了传输损耗,同时也会减少电子设备的可靠性、安全性和寿命周期,因此,在智能楼宇中实现电能质量补偿是非常必要的<sup>[5]</sup>。

2) 能量流动过程复杂。在大多数楼宇的电力系统中,电能是从电网侧流向负载侧,随着EV和分布式发电装置的出现,电能可以由分布式发电装置供给,这样可以实现合理利用能量的目标,既可以避免电能浪费,又能保证负载需要时内部电能的供给,而且可以在内部电能过剩时供给电网,实现“削峰填谷”的效果<sup>[6-8]</sup>。单个用户的EV和分布式发电装置所发出的电能是有限且不稳定的,如果能对智能楼宇内的若干EV和分布式发电装置进行统一合理管理,就能更合理地利用能量。

3) 各种规格的接口阻碍了电能路由器的发展。现有的接入方案需要大量电能变换器,其中大多数只是为了某一单一功能而设计使用,此外多台变换器还会带来协调控制难题。电能质量补偿、电能供给以及分布式发电功能往往是通过相互独立、功能单一的装置而实现的,这样设备被大量重复装置造成浪费,而且相互独立的各个装置无法实现能源的统一调配和控制,无法为用户提供统一的接口,未统一的接口只能适配与其标准相同的设备。随着新能源EV和分布式发电装置的出现,会出现更多标准不同的新接口<sup>[9-10]</sup>,设备之间更会出现新的协调问题,甚至造成设备的不稳定而影响设备运行安全,增加用户的安装、使用和维护成本。

目前,基于楼宇的供电系统所面临挑战的分析,亟需提出一种新型的供电方案,统一解决上述电能质量、双向负载统一调度以及统一接口问题。近年来,在多端口电能变换器和电能路由器设备领域研究中,2023年,文献[8]提出一种考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统,虽然统一考虑了削峰填谷的电能调度,但未统一考虑电能质量问题以及并未提供统一的电能传输接口<sup>[9]</sup>;2021年,文献[11]提出了一种可以同时具有3个输出端口的电能路由器,但因输出端口均为有线形式,在连接便利性上受到了限制;2021年,文献[12]提出了一种电能路由器及能量管理方法,可以实现多个电气设备的有线连接以及能源管理分配,但是仅有有线连接,仍然由大量AC-DC、AC-AC和DC-DC设备实现电能变换;2021年,文献[13]公开了交流电网用电能路由器,可以实现2个功率节点的功率交换,但是仅有有线连接,而功率单元有限;2023年,文献[14]公开了用于多端柔性直流输电应用的多端口模块化多电平电能路由器,可以实现通过改变变换器结构实现功率、损耗的减少,但是仅有交流有线接口。具有代表性的功补偿装置拓扑结构对比如表1所示。

表1 具有代表性的功补偿装置拓扑结构对比

Table 1 Topologies of representative power compensation devices

年份	参考文献	端口传递能量方式	电能质量补偿	端口数量
2023	[4]	有线	考虑	多端口
2021	[6]	有线	未考虑	三端口
2021	[7]	有线	未考虑	多端口
2021	[8]	有线	未考虑	两端口
2023	[9]	有线	未考虑	多端口
2024	本文	无线	考虑	多端口

基于表1的分析,目前的电能路由器装置无法同时进行电能质量补偿、双向负载统一调度以及为负载提供统一接口。因此,本文基于上述3个挑战和亟待解决的问题,提出一种无线电能路由器及其控制方法,通过电能路由器同时为楼宇供电系统提供电能质量补偿,对双向负载进行统一调度,并且为系统提供统一的无线电能传输接口。

## 1 无线电能路由器的构成及等效模型

所提无线电能路由器包括:电能变换器,前

端接三相交流电网;直流母线,与电能变换器后端并联;多个并联的双向无线电能传输接口,与上述直流母线并联;交流接口,设置在电网侧与上述电能变换器之间,以连接交流负载;直流接

口,设置在直流母线输出端,以连接直流负载。本文所提无线电能路由器的电路及安装示意图 1 所示,其中关于各种能量符号所代表的含义如表 2 所示。

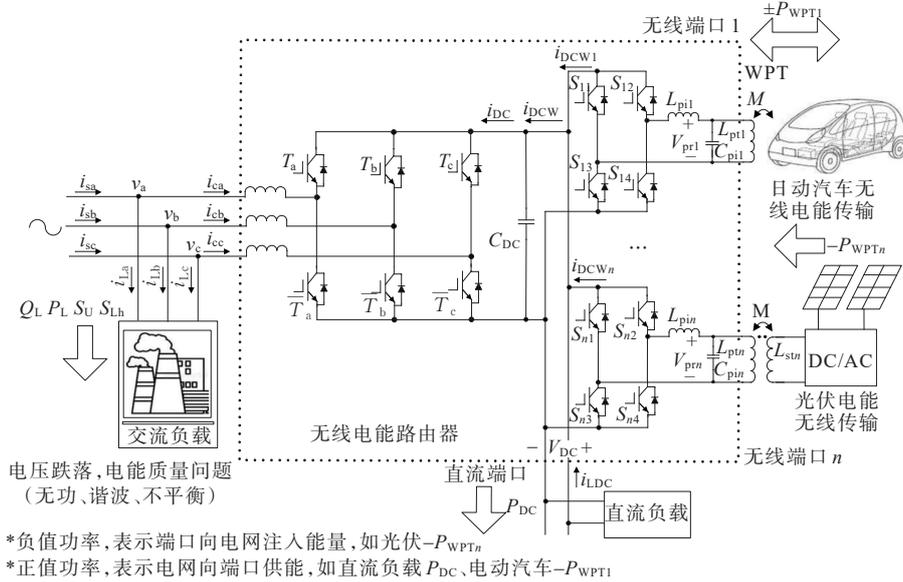


图 1 所提无线电能路由器的电路及安装示意

Figure 1 Circuit and installation of proposed wireless energy router

表 2 能量符号所代表的含义  
Table 2 Meaning of energy symbols

能量符号	含义解释
$P_L$	交流负载所需的有功功率
$S_{Lh}$	交流负载进行谐波补偿所需的逆变器容量
$S_U$	交流负载进行不平衡补偿所需的逆变器容量
$Q_L$	交流负载所需的无功功率
$P_{WPT}$	WPT 端口的总输出功率
$P_{WPTn}$	第 $n$ 个无线电能传输端口的有功功率

图 1 中三相三线区域无线电能路由器装置包括:基于全控型电力电子器件绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的有源逆变器电能变换器部分,含一个电能变换器、一条直流母线以及多个双向无线电能传输(bidirectional wireless power transfer, BD-WPT)接口及其控制装置。所述的电能变换器部分则是一个带有耦合电感由 IGBT 组成的电压型逆变器,其前端并入三相交流电网,后端并入一个带有直流电容  $C_{DC}$  的直流母线,直流母线上并联多个 BD-WPT,其包含由可控开关元件组成的单相 H 桥、电容电感组成的补偿网络和线圈,由其提供 BD-WPT 接口,而后每个 BD-WPT 接口又可以根据需求连接 EV 或者分布式发电装置。光伏板后添加一阶 DC/AC

变换为无线方式,再并联到直流母线上以实现最大功率点追踪(maximum power point tracking, MPPT)。电能变换器接入三相交流电网需要的直流电压为

$$V_{DC} = A\sqrt{2} \times \sqrt{3} V_x \quad (1)$$

式中,  $V_x$  为电网系统相电压,  $x = a, b, c$ ;  $A$  为电压裕度。

求解任意一个双向无线电能传输接口一次侧调制移相角  $\varphi_{pn}$ 、二次侧调制移相角  $\varphi_{sn}$ , 公式为

$$P_{WPTn}(\varphi_{pn}, \varphi_{sn}, \theta_n) = \pm \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{\omega_s M} \cdot V_{DC} V_{outn} \sin\left(\frac{\varphi_{pn}}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_{sn}}{2}\right) \sin \theta_n \quad (2)$$

$$Q_{WPTn}(\varphi_{pn}, \varphi_{sn}, \theta_n) = \pm \frac{8}{\pi^2} \cdot \frac{1}{\omega_s M} \cdot V_{DC} V_{outn} \sin\left(\frac{\varphi_{pn}}{2}\right) \sin\left(\frac{\varphi_{sn}}{2}\right) \cos \theta_n \quad (3)$$

式(2)、(3)中,  $P_{WPTn}(\varphi_{pn}, \varphi_{sn}, \theta_n)$ 、 $Q_{WPTn}(\varphi_{pn}, \varphi_{sn}, \theta_n)$  分别为二次侧需求或提供的有功、无功功率;  $M$  为互感系数;  $V_{DC}$  为一次侧输入直流电压;  $V_{outn}$  为二次侧输出的直流电压;  $\theta_n$  为无线电能路由器一二次侧产生的 2 个电压之间的相对相位角;  $\omega_s$  为一二次双向无线电能传输接口的相对角开关频率,其等于角谐振频率<sup>[15]</sup>。

结合式(1)~(3)即可描述无线电能路由器的等效模型。无线端口电路如图2所示。

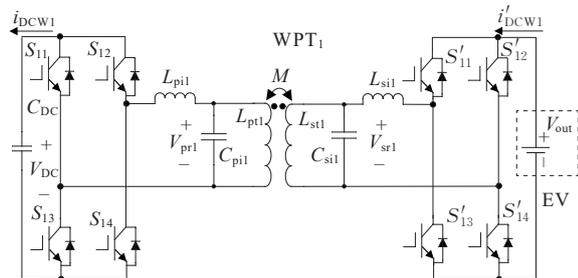


图2 无线端口电路示意

Figure 2 Circuit of wireless port

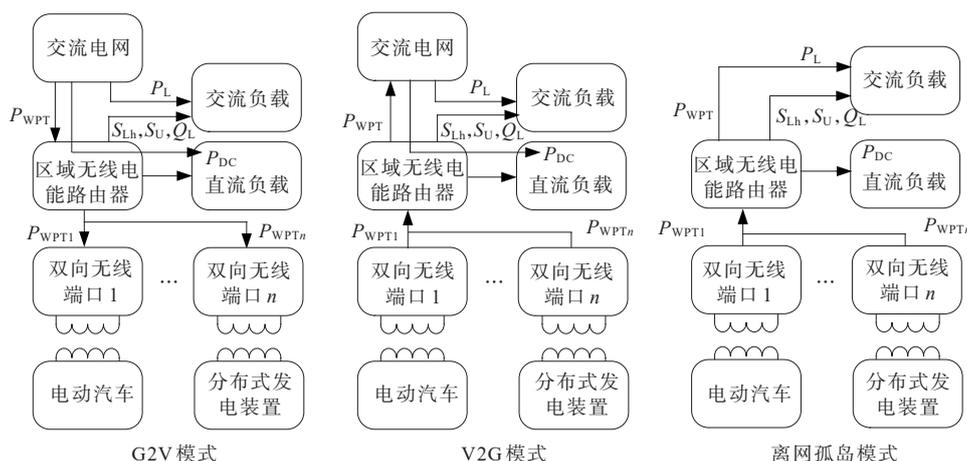


图3 各种模式的能量流动

Figure 3 Energy flow in various modes

## 2.1 并网模式的V2G和G2V控制方法

本文所提无线电能路由器通过控制无线端口1-n对负载进行供电,其无线端口均具有向负载充电和将负载能量并网2种功能。双向能量流动的设计是为了灵活接入电动车负载,使电动车作为灵活负载参与电网的智能调控。针对能量流入和流出电网2个主要方向,无线电能路由器的能量流动可以分为向电网充电的V2G和从电网获取电能的G2V模式<sup>[17]</sup>。

对于V2G模式或分布式发电装置,  $\theta_n = +90^\circ$ 、 $\varphi_{sn} = 180^\circ$ 、 $\varphi_{pn} = 180^\circ$ ;对于G2V模式,  $\theta_n = -90^\circ$ 、 $\varphi_{sn} = 180^\circ$ 。在并网模式下,通过滞环脉宽调制方法控制补偿电流跟踪电能变换器的参考信号,从而产生电能变换器开关管的触发信号<sup>[18-20]</sup>。待补偿电流为。

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{2/3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中,  $i_{ca}^*$ 、 $i_{cb}^*$ 、 $i_{cc}^*$ 分别为所提无线电能路由器向电网a、b、c三相注入电流的参考值;  $i_{ca}^*$ 、 $i_{cb}^*$ 、 $i_{cc}^*$

## 2 无线电能路由器的能量流动控制方法

通过控制无线电能路由器产生的电流和电流方向,即可实现控制无线电能路由器中能量流动的方向,并在多种工作模式下切换。所提无线电能路由器按照运行模式可以划分为并网V2G(vehicle-to-grid)、从电网获取电能的G2V(grid-to-vehicle)和离网孤岛模式<sup>[16]</sup>,并进行电能补偿。各种模式的能量流动如图3所示。

在 $\alpha\beta$ 坐标系中的分量。求解  $i_{ca}^*$ 、 $i_{c\beta}^*$  如下:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{c\beta}^* \end{bmatrix} = -\frac{1}{(v_a^+)^2 + (v_\beta^+)^2} \cdot$$

$$\begin{bmatrix} v_a^+ & v_\beta^+ \\ v_\beta^+ & -v_a^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p}_L + P_{WPT} + P_{DC} \\ q_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $P_{DC}$ 、 $P_{WPT}$ 分别为直流侧和无线电能传输端口的能量;  $p_L$ 为负载有功功率;  $\tilde{p}_L$ 为  $p_L$ 交流分量;  $q_L$ 为负载无功功率;  $v_a^+$ 、 $v_\beta^+$ 分别为三相电压  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$ 的正序分量在 $\alpha\beta$ 坐标系中的分量。求解  $v_a^+$ 、 $v_\beta^+$ 如下:

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中,  $v_a^+$ 、 $v_b^+$ 、 $v_c^+$ 为三相电压  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$ 的正序分量。求解  $v_a^+$ 、 $v_b^+$ 、 $v_c^+$ 如下:

$$\begin{bmatrix} v_a^+ \\ v_b^+ \\ v_c^+ \end{bmatrix} = T_2 \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - T_1 \cdot \begin{bmatrix} v_a^D \\ v_b^D \\ v_c^D \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中,  $v_a^D$ 、 $v_b^D$ 、 $v_c^D$ 为三相电压  $v_a$ 、 $v_b$ 、 $v_c$ 经过延迟  $90^\circ$ 获得的延迟信号;  $T_1$ 、 $T_2$ 为2个参数矩阵。

$$T_1 = \frac{1}{2\sqrt{3}} \times \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$T_2 = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & -0.5 & -0.5 \\ -0.5 & 1 & -0.5 \\ -0.5 & -0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(5)中  $P_{DC}$ 、 $P_{WPT}$ 、 $p_L$  和  $q_L$  可以由如下公式分别求得:

$$P_{DC} = V_{DC} \cdot I_{LDC} \quad (10)$$

$$P_{WPT} = \sum_{n=1}^N \pm P_{WPTn} = \sum_{n=1}^N V_{DC} \cdot (\pm i_{DCWn}) = V_{DC} \cdot i_{DCW} \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} p_L \\ q_L \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha^+ & v_\beta^+ \\ -v_\beta^+ & v_\alpha^+ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha^+ \\ i_\beta^+ \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(10)~(12)中,  $I_{LDC}$  为直流负载电流;  $V_{DC}$  为直流端口的直流电压;  $n$  表示第  $n$  个 BD-WPT 端口;  $N$  表示 BD-WPT 端口的总数;  $i_{DCW}$  为 BD-WPT 流入直流

母线的电流;  $i_\alpha^+$ 、 $i_\beta^+$  分别为三相负载电流的正序分量  $i_{La}^+$ 、 $i_{Lb}^+$ 、 $i_{Lc}^+$  在  $\alpha\beta$  坐标系中的分量。求解  $i_\alpha^+$ 、 $i_\beta^+$  如下:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha^+ \\ i_\beta^+ \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{La}^+ \\ i_{Lb}^+ \\ i_{Lc}^+ \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中,  $i_{La}^+$ 、 $i_{Lb}^+$ 、 $i_{Lc}^+$  分别为三相负载电流  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$  的正序分量。求解  $i_{La}^+$ 、 $i_{Lb}^+$ 、 $i_{Lc}^+$  如下:

$$\begin{bmatrix} i_{La}^+ \\ i_{Lb}^+ \\ i_{Lc}^+ \end{bmatrix} = T_2 \cdot \begin{bmatrix} i_{La} \\ i_{Lb} \\ i_{Lc} \end{bmatrix} - T_1 \cdot \begin{bmatrix} i_{La}^D \\ i_{Lb}^D \\ i_{Lc}^D \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中,  $i_{La}^D$ 、 $i_{Lb}^D$ 、 $i_{Lc}^D$  分别为三相负载电流  $i_{La}$ 、 $i_{Lb}$ 、 $i_{Lc}$  经过延迟  $90^\circ$  获得的延迟信号。

本文所提 V2G 和 G2V 控制方法首先根据式(4)~(13)进行信号的提取、计算和输出; 然后根据图 4 进行相应的控制, 即可保证系统并网和电能质量<sup>[21]</sup>; 最后, 通过滞环脉宽调制方法控制补偿电流跟踪电能变换器的参考信号, 从而产生电能变换器开关管的触发信号<sup>[22]</sup>。

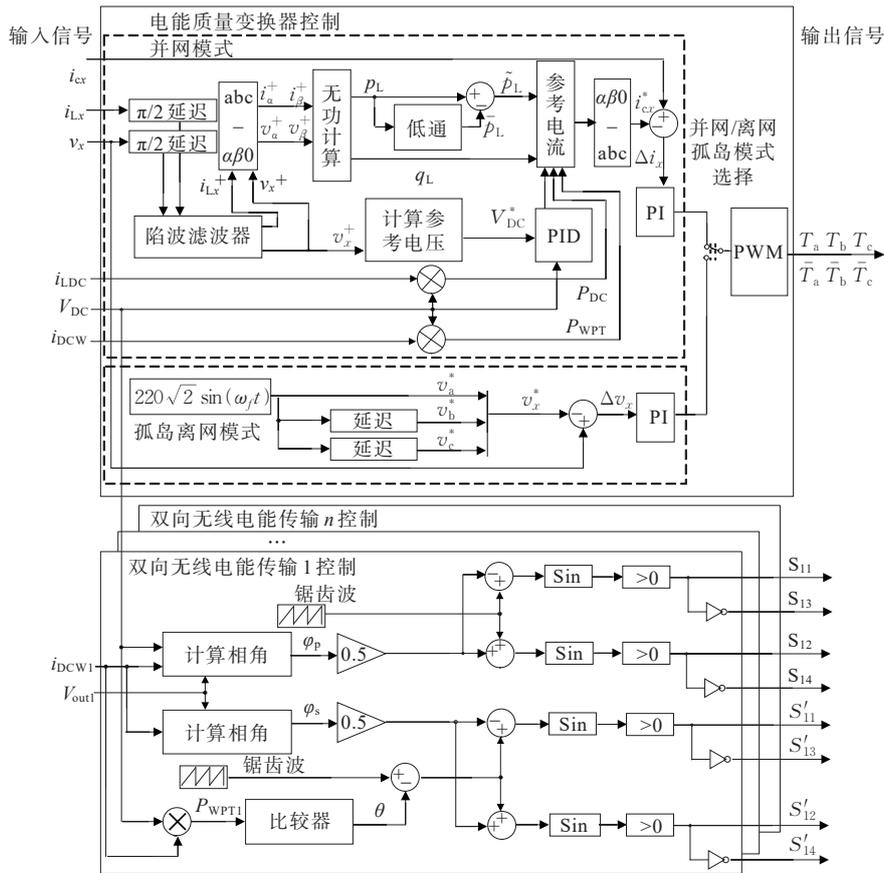


图 4 系统的控制框图

Figure 4 Block diagram of control system

## 2.2 离网孤岛运行的控制方法

在离网孤岛模式下, 通过带 PI 控制的滞环脉宽

调制方法控制产生的电压跟踪电能变换器的参考电压, 产生离网孤岛工作模式电能变换器开关管的

触发信号。计算电能变换器的参考电压：

$$\begin{bmatrix} v_a^* \\ v_b^* \\ v_c^* \end{bmatrix} = \sqrt{2} V_x \begin{bmatrix} \sin(\omega_i t) \\ \sin(\omega_i t + 2/3\pi) \\ \sin(\omega_i t - 2/3\pi) \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中,角频率 $\omega_i=2\pi\cdot 50$  rad/s。相应地,本文提供一种无线电能路由器控制方法。

### 3 仿真案例分析

本文所提无线电能路由器系统主要功能:①控制无线电能传输端口和电网之间的能量流动;②对系统进行电能质量补偿;③在离网情况下对负载进行供电。基于此,本文通过仿真对所提无线电能路由器的功能进行逐一验证,验证所提无线电能路由器能有效应用在三相三线电力系统中,在一套系统中实现所述3个功能(系统示意图1,BD-WPT部分见图2,控制方法见图4)。

#### 3.1 并网模式的仿真

##### 3.1.1 并网模式的V2G运行仿真

V2G模式下于0.075、0.150 s时分别并入直流负载和交流负载,产生有功消耗 $P_{DC}$ (2 500 W)和交流负载消耗 $P_L$ (3 000 W)的情况分别如图5(a)、(b)所示。0.000~0.075 s时没有负载接入,BD-WPT向电网输出4 000 W有功功率( $P_s$ );0.075~0.150 s时由于直流负载的并入,故BD-WPT向直流负载输出2 500 W有功功率,剩余的1 500 W有功功率注入电网,负号表示向电网注入功率;0.150~0.225 s时由于交流负载的并入,故BD-WPT向交流和直流负载输出4 000 W有功功率,由于此时不够全部供给负载的能量,整个系统还需要从点电网获取1 500 W。对比负载电流 $i_{Lx}$ 波形,电网侧电流 $i_{sx}$ 波形不含谐波并与 $v_{sx}$ 同相位,表明此时无线电能质量问题,其无功和谐波均被消除。BD-WPT部分的一二次侧电压、电流对比如图5(c)所示, $V_{DC}=700$  V、 $V_{out}=400$  V,一次侧电压、电流反向,说明从BD-WPT向系统输出有功功率,此时由于为V2G模式, $\varphi_s=\varphi_p=180^\circ$ 。仿真数据如表3所示。

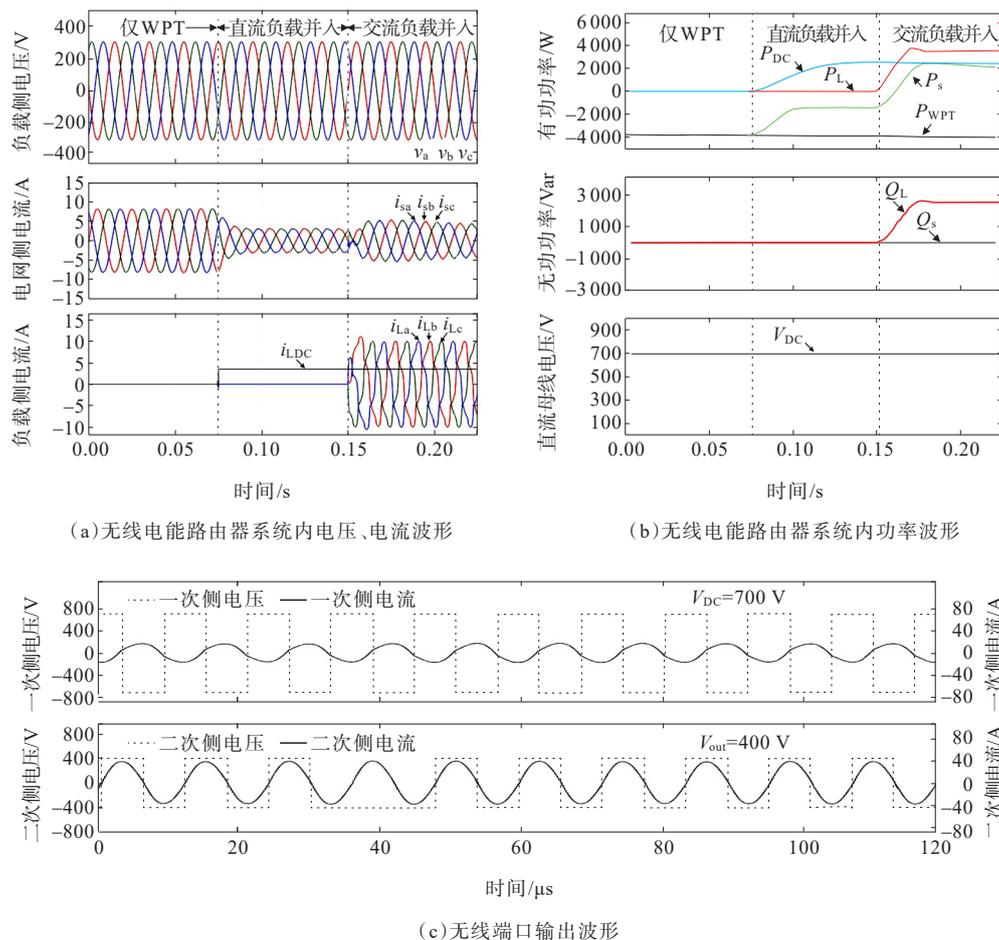


图5 V2G模式下无线电能路由器系统及无线端口仿真波形

Figure 5 Simulation waveforms of wireless energy router system and wireless ports in V2G mode

表 3 V2G 模式无线电能路由器仿真数据

Table 3 Wireless energy router simulation data in V2G mode

仿真时间/s	系统改变	$P_s$ / W	$P_{WPT}$ / W	$i_{sr}THD$ / %	$i_{sr}$ 功率 因数
0.000~0.075	没有负载接入	-4 000	4 000	2.8	0.99
0.075~0.150	直流负载并入	-1 500	2 500	2.9	0.99
0.150~0.225	交流负载并入	1 500	4 000	3.3	0.99

3.1.2 并网模式的 G2V 运行仿真

G2V 模式下 0.075 s 时并入直流负载产生有功消耗  $P_{DC}$  (2 500 W), 0.150 s 并入交流负载产生交流负载  $P_L$  (3 000 W), 如图 6(a) 所示。0.000~0.075 s

时没有负载接入, 电网向 BD-WPT 输出 5 500 W 有功功率; 0.075~0.150 s 时由于直流负载的并入, 电网向直流负载输出 2 500 W, 电网向 BD-WPT 输出 5 500 W 有功功率, 共 8 000 W 有功功率全部来自电网; 0.150~0.225 s 时由于交流负载的并入, 电网需再向交流负载输出 3 000 W, 共 11 000 W 有功功率来自电网, 其无功和谐波均被抑制。BD-WPT 部分的一二次侧电压、电流对比如图 6(b) 所示,  $V_{DC}=700$  V、 $V_{out}=400$  V, 一次侧电压电流同相, 说明从系统向 BD-WPT 输出有功功率, 此时由于为 G2V 模式, 根据额定  $P_{WPT}$  的要求,  $\varphi_p=60^\circ$ 、 $\varphi_s=180^\circ$ 。仿真数据如表 4 所示。

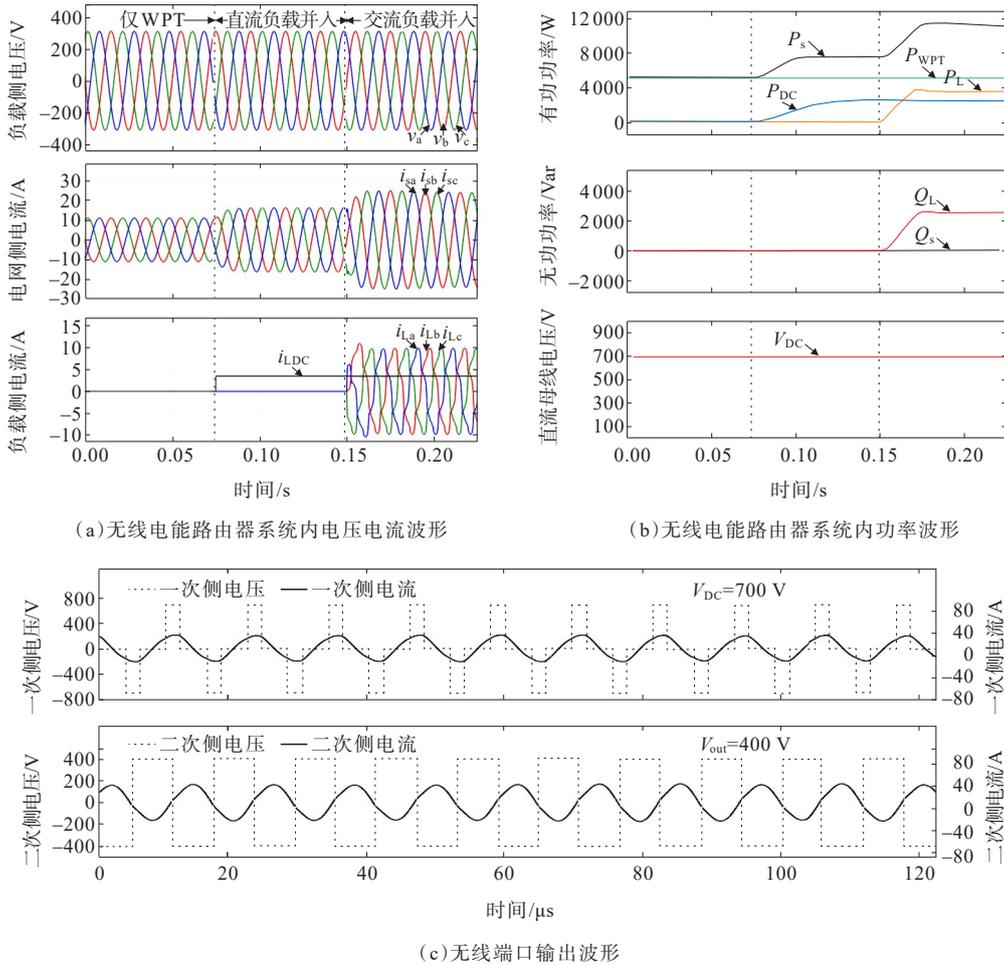


图 6 G2V 模式下无线电能路由器系统及无线端口的仿真波形

Figure 6 Simulation waveforms of wireless energy router system and wireless ports in G2V mode

表 4 G2V 模式无线电能路由器仿真数据

Table 4 Wireless energy router simulation data in G2V mode

仿真时间/s	系统改变	$P_s$ / W	$P_{WPT}$ / W	$P_L$ / W	$i_{sr}THD$ / %	$i_{sr}$ 功率 因数
0.000~0.075	没有负载接入	5 500	5 500	0	2.2	0.99
0.075~0.150	直流负载并入	8 000	5 500	2 500	2.4	0.99
0.150~0.225	交流负载并入	11 000	5 500	5 500	2.9	0.99

3.2 仿真案例

1) 电能质量补偿。

在电压跌落的情况下, 为了验证本文所提无线电能路由器对负载的电流补偿能力, 设定条件为 G2V 模式, 全部 11 000 W 有功功率来自交流电网, 如图 7 所示。0.075~0.150 s 时出现 b 相电压跌落,

随后 0.150 s 时恢复。在所提智能公寓新型无线电能路由器补偿作用下,  $i_{sr}$  并未像  $i_{Lr}$  一样含有谐波和无功, 而是仍然保持为正弦波形并且和电网侧电压  $v_{sr}$  保持相同相位。仿真数据如表 5 所示。

2) 离网孤岛模式。

在离网孤岛工作模式下验证了本文所提无线电能路由器对负载供电能力。设定条件为 V2G 模式,

如图 8 所示。0.000~0.075 s 时负载共需求 5 500 W 有功功率, 由电网供给 2 500 W 有功功率, BD-WPT 端口供给 3 000 W 有功功率。0.075 s 时由并网转为离网孤岛模式, 离网孤岛模式下  $i_{sr}$  中断, 表示无电流流入交流电网, 但  $v_{sr}$  被电能路由器重建, 全部 5 500 W 有功功率来自 BD-WPT 部分, 且负载电流维持与并网模式相同。仿真数据如表 6 所示。

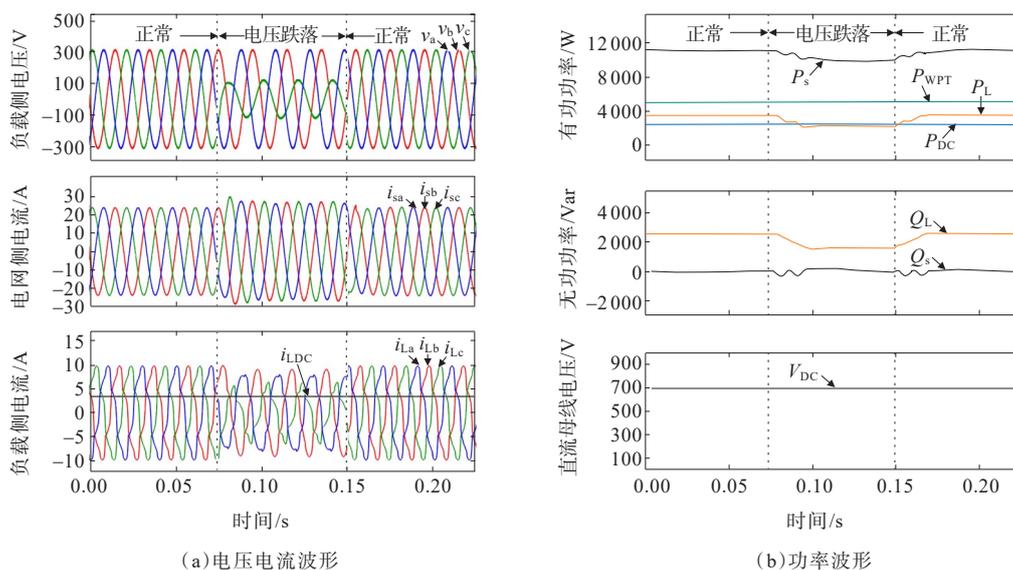


图 7 G2V 模式下无线电能路由器系统电压跌落功能的补偿仿真例

Figure 7 Simulation example of voltage drop compensation of wireless energy router system in G2V mode

表 5 G2V 模式下电压跌落时无线电能路由器仿真数据

Table 5 Simulation data of wireless energy router during voltage drop in G2V mode

仿真时间/s	系统改变	$P_s$ /W	$P_{WPT}$ /W	$P_L$ /W	$i_{sr}$ THD/%	$i_{sr}$ 功率因数
0.000~0.075	交、直流负载均并入, 系统正常	11 000	5 500	5 500	2.5	0.99
0.075~0.150	b 相电压跌落 65%	10 000	5 500	4 500	4.4	0.99
0.150~0.225	交、直流负载均并入, 系统恢复正常	11 000	5 500	5 500	2.9	0.99

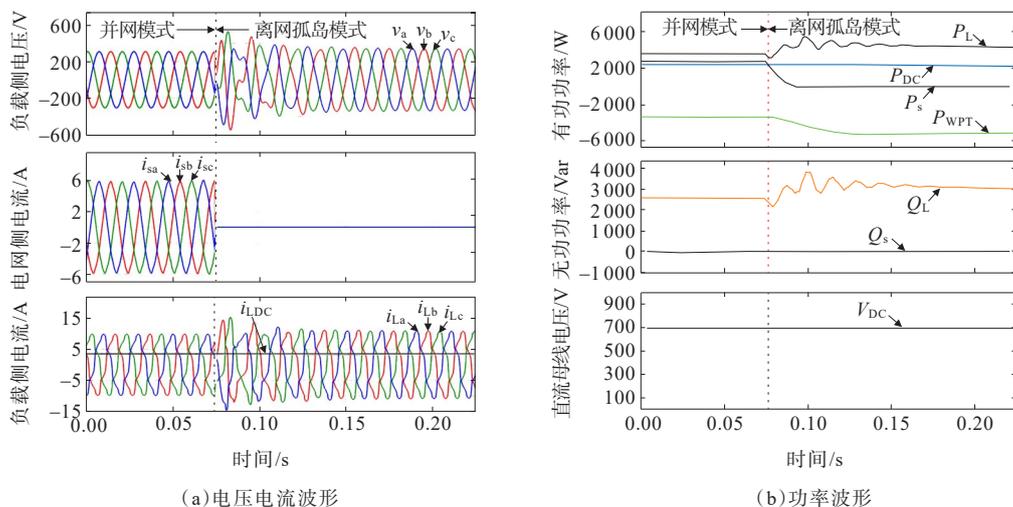


图 8 离网孤岛模式下无线电能路由器系统的仿真案例

Figure 8 Simulation example of wireless energy router system in off-grid islanding mode

表6 G2V模式下离网孤岛模式无线电能路由器仿真数据

Table 6 Simulation data of wireless energy router under off-grid islanding mode in G2V mode

仿真时间/s	系统改变	$P_s/W$	$P_{WPT}/W$	$P_L/W$	$i_{sr}THD/\%$	电网侧电流功率因数
0.000~0.075	交、直流负载均并入,系统正常	2 500	3 000	5 500	2.8	0.99
0.075~0.150	切断交流电网,进入离网孤岛模式	0	5 500	5 500	—	—

## 4 结语

本文提出了一种创新的无线电能路由器以及控制方法,集成了电能质量补偿、电压支撑、离网孤岛运行、功率控制及无线能量传输功能,专为智能楼宇设计。相较于传统有线能源路由器及分散接口,本文提出的无线电能路由器,将楼宇内的EV作为动态储能单元,智能调配新能源发电,避免能源浪费,实现“削峰填谷”,节能环保,并且降低了安装、使用及维护成本。通过不同场景的仿真结果,证明了该方法通过统一管理能源,有效应对电压跌落、谐波污染等电能质量问题。

### 参考文献:

- [1] 柳梦琳,马大中,孙秋野.基于信息-物理模型的多能源路由器多目标优化[J].电力科学与技术学报,2021,36(1):32-41.  
LIU Menglin, MA Dazhong, SUN Qiuye. Multi-objective optimization of multi-energy router based on a cyber physical model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 32-41.
- [2] 李直帆,张辉,王绪利,等.基于电动汽车无线充电的建筑侧光伏系统灵活功率控制[J].电网与清洁能源, 2024, 40(9): 114-122+140.  
LI Zhifan, ZHANG Hui, WANG Xuli, et al. A study on the flexible power control of building-side photovoltaic systems based on electric vehicles wireless charging[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(9): 114-122+140.
- [3] 施灵卫,刘桂英.多LAN端口能量路由器切换控制策略研究[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):84-90.  
SHI Lingwei, LIU Guiying. Research on switching control strategy for the multi-LAN-port energy router[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(2): 84-90.
- [4] 杨秀,胡晓龙,孙改平,等.考虑电能共享的楼宇虚拟电厂协调优化调度[J].电力科学与技术学报,2022,37(1): 96-105.  
YANG Xiu, HU Xiaolong, SUN Gaiping, et al. Coordinated optimization scheduling of building virtual power plant considering power sharing[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(1): 96-105.
- [5] 万保权,祁鹏,刘健森,等.基于实测数据的充电设施电能质量分析[J].供用电,2023,40(6):75-83.  
WAN Baoquan, QI Peng, LIU Jianben, et al. Power quality analysis of charging facilities based on measured data[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(6): 75-83.
- [6] 赵宇,李谦,张云晓,等.含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J].智慧电力,2024,52(8):25-32,49.  
ZHAO Yu, LI Qian, ZHANG Yunxiao, et al. Optimal configuration of hybrid energy storage considering power supply reliability in distribution network with distributed energy[J]. Smart Power, 2024, 52(8): 25-32, 49.
- [7] 李英量,孙楠,王德明,等.含分布式储能系统的交直流配电网动态故障恢复策略[J].电力系统保护与控制, 2024, 52(18): 179-187.  
LI Yingliang, SUN Nan, WANG Deming, et al. A dynamic fault recovery strategy for an AC/DC distribution network with distributed energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(18): 179-187.
- [8] 张育维,胡海涛,耿安琪,等.考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统容量优化配置[J].电力自动化设备, 2023, 43(2): 44-50.  
ZHANG Yuwei, HU Haitao, GENG Anqi, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for electrified railway considering peak load shifting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 44-50.
- [9] 纪慧超,王海鑫,杨俊友,等.基于分布式固体电储能能量转移的电热联合系统优化调度策略[J].电机与控制学报,2022,26(12):48-62.  
JI Huichao, WANG Haixin, YANG Junyou, et al. Optimal scheduling strategy of combined electricity and heat systems based on energy transfer of distributed solid electric thermal storage[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(12): 48-62.
- [10] 庞松岭,赵海龙,张晨佳.计及充电需求差异的电动汽车充电设施协同优化配置[J].电测与仪表,2024,61(12): 171-177.  
PANG Songling, ZHAO Hailong, ZHANG Chenjia. Collaborative optimization configuration of electric vehicle charging facilities considering differences in charging demand[J]. Electrical Measurement &

- Instrumentation,2024,61(12):171-177.
- [11] WANG L,PANG Y,WONG M,et al.A new topology of three-port power hub converter with power quality compensation for remote area residential power supply [J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,2021,68(11): 10336-10348.
- [12] HU J, LIU X, SHAHIDEHPOUR M, et al. Optimal operation of energy hubs with large-scale distributed energy resources for distribution network congestion management[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy,2021,12(3): 1755-1765.
- [13] HUANG W,DU E,CAPUDER T,et al. Reliability and vulnerability assessment of multi-energy systems: an energy hub based method[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2021,36(5): 3948-3959.
- [14] 袁立强,戴宇轩,牟迪,等. 共高频母线电能路由器局部模块闭锁研究[J]. 中国电机工程学报,2023,43(20): 8005-8015.  
YUAN Liqiang, DAI Yuxuan, MOU Di, et al. Study on partial module blocking in high-frequency-bus electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(20): 8005-8015.
- [15] AGGARWAL S, KUMAR N, GOPE P. An efficient blockchain-based authentication scheme for energy-trading in V2G networks[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics,2021,17(10): 6971-6980.
- [16] JENA P, SINGH R K, LAL V N. Novel modulation technique based bidirectional DC to AC dual active bridge for G2V and V2H[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2024,73(1): 80-92.
- [17] PANG Y, WONG M C, LI G, et al. Fusion multilevel hybrid multi-vsc topology's  $m$ -to-1 rating design for current sharing with reduced capacity and enhanced efficiency[J]. IEEE Transactions Industrial Electronics, 2024,71(8): 8291-8303.
- [18] HSU Y,KAO S,HO C,et al.On an electric scooter with G2V/V2H/V2G and energy harvesting functions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 6910-6925.
- [19] 刘又榕,林顺富,沈运帷,等. 计及电动汽车参与多元需求响应的微电网多时间尺度优化调度模型[J]. 电力建设, 2023, 44(10): 51-62.  
LIU Yourong, LIN Shunfu, SHEN Yunwei, et al. Multi-time-scale optimization scheduling model of microgrid with electric vehicles participating in multiple demand response[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(10): 51-62.
- [20] 谢学渊,刘潇潇,李超,等. 考虑分布式电源和电动汽车集群调度的配电网网络重构[J]. 中国电力, 2023, 56(1): 119-125.  
XIE Xueyuan, LIU Xiaoxiao, LI Chao, et al. Distribution network reconfiguration considering distributed generation and electric vehicle cluster scheduling[J]. Electric Power, 2023, 56(1): 119-125.
- [21] YU S, PARK K. PUF-based robust and anonymous authentication and key establishment scheme for V2G networks[J].IEEE Internet of Things Journal,2024,11(9): 15450-15464.
- [22] PANG Y,ZHANG X,LI G,et al.A multiple frequency spectrum impedance matching method of nonlinear geological surveying electromagnetic method for power amplifier capacity utilization enhancement[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2024,72(1): 366-379.