

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211145

基于切换系统理论的终端能量路由器能量路由控制方法研究

王思尹, 粟时平, 王海明, 欧阳振宇, 王豪, 周蔚

(长沙理工大学, 湖南 长沙 410000)

摘要: 终端能量路由器是能源互联网中一种重要的能量路由设备, 构建其能量路由拓扑的最有效途径是采用基于电力电子变流技术的固态变压器。能量路由拓扑确定之后, 能量路由控制技术直接决定着其运行特性。针对终端能量路由器能量路由的混成系统特性, 使用基于混成系统理论的切换系统理论进行终端能量路由器能量路由控制。首先详细分析了终端能量路由器能量路由拓扑结构、工作原理。然后, 深入分析了能量路由器能量路由的切换系统行为特征, 建立了其切换系统模型。其次, 结合空间矢量脉宽调制技术提出终端能量路由器多模态切换控制方法。最后, 通过 Matlab/Simulink 仿真平台搭建模型验证所提控制方法的有效性。理论分析和仿真表明, 该方法充分考虑了终端能量路由器运行过程中离散变量与连续变量的相互作用, 具有切换时间短、切换过程平稳的特点, 从而优化了动态调节特性, 提高了控制跟踪速度和控制精度。

关键词: 能源互联网; 终端能量路由器; 空间矢量脉宽调制; 混成系统; 切换控制

An energy routing control method for a terminal energy router based on switching system theory

WANG Siyin, SU Shiping, WANG Haiming, OUYANG Zhenyu, WANG Hao, ZHOU Wei

(Changsha University of Science and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: The terminal energy router is an important piece of energy routing equipment in the energy internet. The most effective way to construct its topology is to use a solid-state transformer based on power electronic converter technology. After the energy routing topology is determined, the control technology directly determines its operational characteristics. This paper uses switching system theory based on hybrid system theory to control the energy routing of the terminal energy router. First, the topology and working principle of the router are analyzed in detail. Then, the switching system behavior characteristics of are analyzed, and a switching system model is established. Secondly, combined with space vector pulse width modulation technology, a multi-mode switching control method is proposed. Finally, a model is built through Matlab/Simulink simulation platform to verify the effectiveness of the proposed method. Theoretical analysis and simulation show that this method fully considers the interaction between discrete and continuous variables in the operation of the router, and has the characteristics of short switching time and stable switching process. This optimizes the dynamic regulation characteristics and improves control tracking speed and accuracy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51708194 and No. 51507014).

Key words: energy internet; terminal power router; SVPWM; hybrid system; switching control

0 引言

随着能源短缺与环境污染问题的日益严重, 新型能源正逐步取代传统的化石能源。传统的单一集中式输电也正向着分布式输电方向发展。随着电力市场的改革与电能技术的发展以及电网的结构升级与智能化, 终端用户有了更多的选择空间, 可以在

负载与源之间切换接入电网。因此产生了能量信息双向流通的需求^[1-2]。为满足未来电网的多样性需求, 日本学者提出了数字电网概念^[3]。借鉴信息互联网的构架体系, 美国 FREEDM 中心提出能源互联网的概念^[4]。

传统的配电网是能量单向流动的树状电网。能源互联网则是采取积极主动的控制管理方式完成能量与信息的双向流动。其依托先进的自动控制、网络通信及电力电子技术, 运用灵活的网络架构, 利

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51708194, 51507014)

用预测、控制技术以及优化算法,实现对分布式能源的主动控制和管理使之达到最优运行状态^[5-6]。能量路由器为能源互联网的关键设备,是能量与信息流的集合体,是实现能量信息双向流动的核心设备。其综合信息的交互借助先进的电力电子变流器技术,灵活地进行整流、逆变、斩波、变频、变压。并采用交直流混联、即插即用、能量消纳互补、实时通信等技术打造灵活可靠的能源互联网,通过源网荷(储)的协调优化控制,实现多种能源的综合利用与协调优化、实现用户与配电网的可靠互联。能量路由器的功能仍在不断发展之中,目前其主要功能为以下几点:(1)支持能量的双向流动与电能参数的调节、滤除谐波,提升电能质量。(2)信息交互,可以采集处理电网与终端数据,为能源互联提供优化策略。(3)即插即用接口,便于交直流负载、分布式能源、电容储能等能量的接入与计量。(4)变压变流与模式切换,实现潮流控制与能量的最优分配。(5)故障诊断,采用智能故障管理技术对网端与用户端故障进行诊断与处理^[7]。

能量路由器根据在电网中位置的不同,分为终端能量路由器、区域能量路由器与主干能量路由器。目前,针对主干能量路由器与区域能量路由器的研究较为成熟,对终端能量路由器的研究较少。而终端能量路由器可以应用于家庭、写字楼、社区等。其应用场所多,应用需求量大,且终端能量路由器在太阳能等分布式能源普及入户的政策下也极具其具有研究价值^[8]。

能量路由器的控制主要包括能量路由控制和信息路由控制,能量路由器的信息路由可以直接借鉴信息互联网中信息路由器的信息路由控制技术,考虑到信息路由器已经得到了广泛应用,其信息路由控制技术已经较为成熟^[9]。因此,能量路由器控制研究的热点主要集中在能量路由控制方面。论文重点对终端能量路由器的能量路由控制进行研究。文献[10]提出一种多直流微网能量路由器协调控制策略,用于多电压等级供电中电网、功率的灵活控制。以提高其瞬态性能及解决各个能量路由器间交互影响的问题。文献[11]提出一种多端口能量路由器,控制稳定,但基于 SPWM 控制,电能利用率相对较低。文献[12]提出一种适用于小型能量路由器的控制管理策略,实现了对网络中能量与信息流的拥塞控制与均衡路由控制,但没有考虑到储能的接入。文献[13]提出一种新型多端口路由器分层控制,实现了系统的协调管理与稳定运行。有效提高了线路利用率。文献[14]提出一种基于扩展移相的混合控制策略以改善系统的动态性能。但控制复杂,影

响能量路由器的传输效率。

在上述文献基础上,本文提出一种基于固态变压器(Solid State Transformer, SST)的终端能量路由器切换控制策略,引入混成切换系统理论,结合离散与动态特性对终端能量路由器进行精细描述。结合空间矢量脉宽调制技术提出终端能量路由器多模态切换控制方法。最后利用仿真平台 Matlab 进行数据研究分析,仿真结果证实基于 SST 的终端能量路由器切换控制策略的有效性。

1 终端能量路由器能量路由拓扑与工作原理分析

1.1 终端能量路由器与配网及用户端连接架构

终端能量路由器安装在电网终端位置,实现终端用户与电网信息能量双向流动与能源互联优化。其构架如图1所示。其接口单元分为WAN端与LAN端。WAN端即表示电网侧、LAN端表示用户侧。中间部分终端能量路由器电能路由单元可以采用SST、多态开关、智能开关等构成。SST集成了电力电子变换器与高频变压器。其体积较小、性价比高、具有高度可控性、具有电气隔离功能、在电能质量管理方面有明显优势。SST更适用于终端用户^[15]。

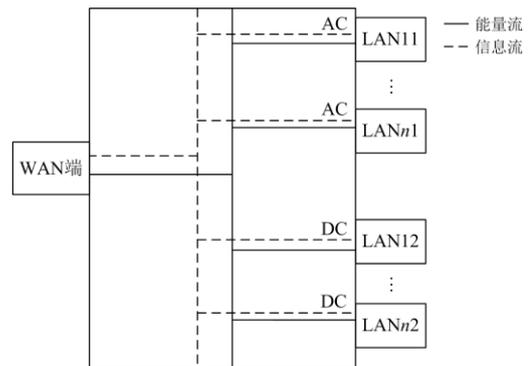


图1 终端能量路由器架构

Fig. 1 Terminal power router architecture

1.2 终端能量路由器能量路由拓扑

本文主要研究基于SST的能量路由器能量路由拓扑。SST为能量路由器的核心结构,可以实现终端能量在多种电能形式和电压等级之间的转换与控制。根据变换过程有无直流环节,将SST实现方式分为两类^[16-17]:

1) AC/AC型SST,变压器体积较小,但控制性能较弱,二次侧谐波含量多。

2) AC/DC/AC型SST,变换过程引入直流环节,先升频,再降频,可以抑制谐波双向流动,控制性能较完善,有利于一二次侧电能质量的优化^[18-19]。

由于电能需反向输入电网, 对电能质量要求较高。故本文基于 AC/DC/AC 型 SST 进行研究。图 2 所示 3 类拓扑为典型 AC/DC/AC 型 SST 拓扑。图 2(a)所示拓扑利用了电位叠加原理, 采用低压功率器件实现在高压系统中的电能转换, 具有良好的扩展性且便于维护; 图 2(b)所示拓扑为模块化级联结构, 可以满足较大的容量与电压需求; 图 2(c)所示拓扑为典型的三级式结构, 结构明了, 功率器件数少。终端能量路由器应用于家庭终端, 图 2(c)拓扑在满足终端用户需求的同时拥有较高的性价比^[20]。本文采取图 2(c)为路由器主电路拓扑。

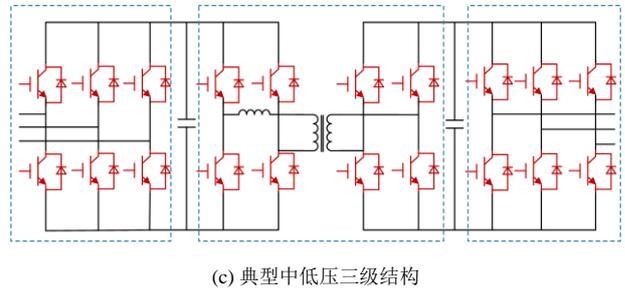
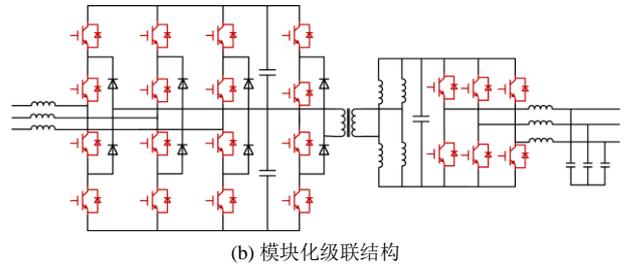
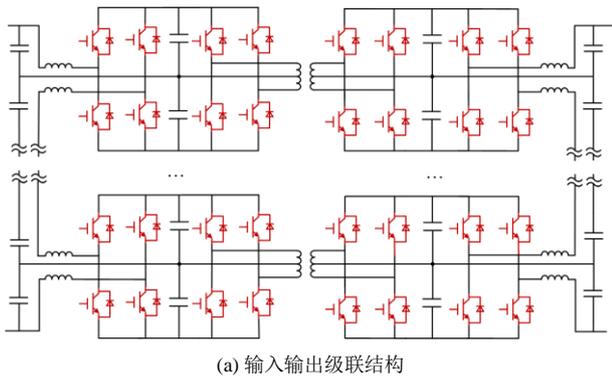


图 2 SST 的拓扑结构

Fig. 2 Topology of SST

1.3 基于 SST 型终端能量路由器工作原理

基于 SST 的终端能量路由器架构如图 3 所示。其接口单元由 4 个端口构成。

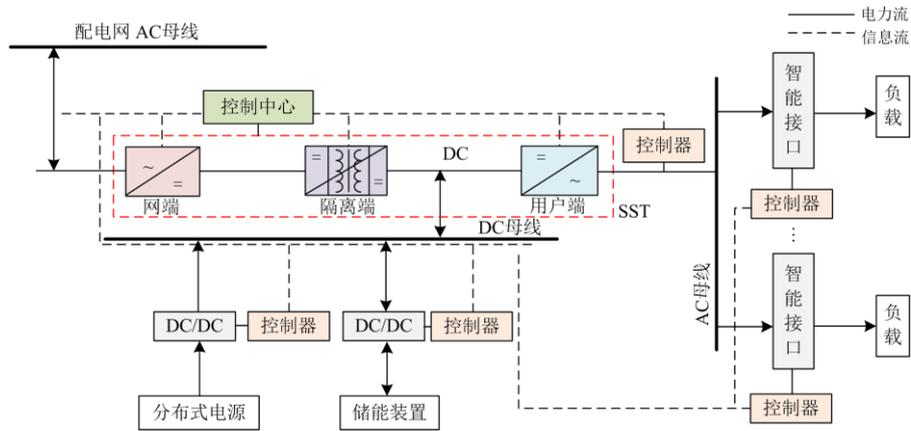


图 3 SST 型终端能量路由器架构

Fig. 3 SST type terminal power router architecture

配电网端口: 配电网网侧 AC/AC 变压器接入终端能量路由器, 在终端用户能量不足时供能, 在终端用户能量过剩时反向吸收剩余能量。

分布式能源端口: 分布式能源经 DC/DC 变压器接入, 为终端供能, 在满足终端能量需求前提下, 能量经路由器馈入配电网。

储能装置端口: 储能电容经 DC/DC 变压器接入终端能量路由器, 削峰填谷。

负载端口: 通过 AC/AC 智能接口接入, 为负载终端提供能量。

主电路 SST 分为网端、隔离端与用户端 3 部分。网端与用户端为双向 AC/DC 变换器, 隔离侧为 DC/DC 变换器。电网向终端并网供电时, 网端高压工频交流电经网端 AC/DC 变换器变换为高压直流, 再经过隔离端的单相全桥变换器变换为高频高压交流电, 经高频变压器变换为高频低压交流, 再经过单相全控整流器变换为直流, 最后经 DC/AC 变换器转换为交流。用户端可以从直流侧和交流侧接入家用负荷与分布式能源, 在能量路由器进行能量信息汇总^[21]。

2 终端电能路由切换系统建模

2.1 切换系统理论的基本原理

传统电力电子建模方法的基本思路呈线性化,即对各开关工作模态在时域上进行平均处理,并忽略掉部分系统中的非线性固有特性。平均化建模对于缓慢变化的信号较为有效,但处于高频状态时会产生较大偏差;伴随着非线性复杂高阶系统的出现,传统建模方法的适用性降低,进而对控制效果产生不利影响^[22]。因此引入混成切换系统对能量路由器进行精细建模,可以更加精准地描述能量路由器的暂态过程,更好地反映系统的动态特性。

混成切换系统为一类特殊的混成系统。相较于传统的建模方式,小信号建模建立于抽象空间状态微分方程,而混成切换系统建立于拓扑结构,其描述更加符合电路特性,更加直观地反映系统的实际状态。在相似性上,混成切换系统更接近原系统。

切换模型即开关转化模型,该模型把复杂的大系统划分为多个线性小区间,再使用控制器对各区间进行切换控制^[23]。其控制模型如图4所示。

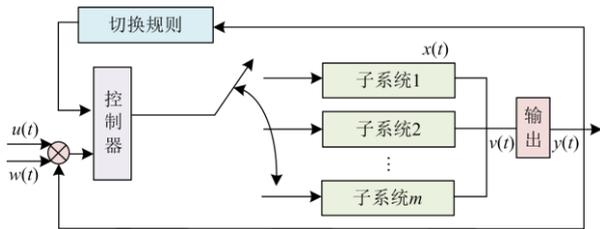


图4 混成切换系统模型简图

Fig. 4 Model diagram of hybrid switching system

切换系统的数学模型可以用如下方程组描述:

$$\begin{cases} \delta x(t) = f_{\delta}(x(t), u(t), w(t)), x(t_0) = x_0 \\ y(t) = g_{\delta}(x(t), v(t)) \end{cases} \quad (1)$$

当表示连续时间系统时,式(1)中 δ 表示微分算子, $x(t)$ 为状态变量,即 $\delta x(t) = \frac{d}{dt}x(t)$;当表示离散时间系统时,式(1)中 δ 表示一步前移算子,即 $\delta x(t) = x(t+1)$, $u(t)$ 是系统控制输入, $w(t)$ 和 $v(t)$ 是系统扰动。

定常线性切换系统的切换系统模型可以表示为

$$\begin{cases} \delta x(t) = A_q x(t) + B_q u(t) \\ y(t) = C_q x(t) + D_q u(t) \end{cases} \quad (2)$$

2.2 能量路由器的切换特性分析

混成切换系统的运行包括连续变化的系统与

离散状态的系统,二者共同构成了混成切换系统的各类参数和运行状态。而配电网同时有连续性变量动态行为和离散性事件动态行为。在配电网中,每个时刻系统的状态参数有所不同,这类参数只在很小的范围内波动变化,这就是系统的连续时间动态特性。与此同时配电网中又存在大量的离散型事件使系统参数发生突变。这两类事件同时作为变量影响系统的运行,因此配电网是一种典型的动态离散变量混成切换系统^[24]。

终端能量路由器随着开关状态不同,对应多种工作模式的电路拓扑。系统根据不同事件与外部变化输入,对各离散状态对应的拓扑结构进行切换运行。其对应的拓扑结构变量随时间状态与外部输出的动态变化而改变。根据以上分析可知,终端能量路由器也明显呈现出混成切换系统动态离散特性。

2.3 能量路由器动态切换系统建模

2.3.1 双向型 AC/DC 变换器切换模式

AC/DC 变换器拓扑结构如图5所示。

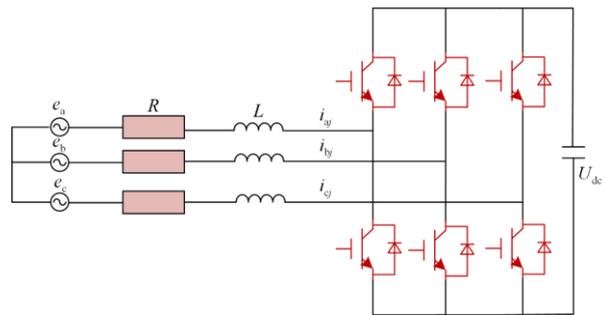


图5 AC/DC 变换器拓扑结构

Fig. 5 Topology control of AC/DC converter

建立描述 AC/DC 模块三相桥臂工作状态的开关函数 S_p 。

$$S_p = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂关断, 下桥臂导通} \\ 0 & \text{上桥臂导通, 下桥臂关断} \end{cases} \quad (3)$$

式中, $p = a, b, c$ 。

每种桥臂有两种工作状态,3个桥臂共有8个工作状态,如表1所示。其中000与001的开关状态所对应的效果相同,实际的有效开关状态为7种。

表1 AC/DC 模块桥臂工作状态

Table 1 Working state of AC/DC module bridge arm

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
S _a	0	0	0	0	1	1	1	1
S _b	0	0	1	1	0	0	1	1
S _c	0	1	0	1	0	1	0	1

状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = -Ri_a(t) - \left(S_a - \frac{1}{3} \sum_{p=a,b,c} S_p \right) U_{dc}(t) + e_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = -Ri_b(t) - \left(S_b - \frac{1}{3} \sum_{p=a,b,c} S_p \right) U_{dc}(t) + e_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = -Ri_c(t) - \left(S_c - \frac{1}{3} \sum_{p=a,b,c} S_p \right) U_{dc}(t) + e_c(t) \\ C \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = -S_a i_a(t) - S_b i_b(t) - S_c i_c(t) \end{cases} \quad (4)$$

双向型 AC/DC 变换器切换模型示意图如图 6 所示。其中状态变量 $x(t) = (i_{aj}, i_{bj}, i_{cj}, u_{dc})$, 输入变量 $u(t) = (e_{aj}, e_{bj}, e_{cj})$ 。

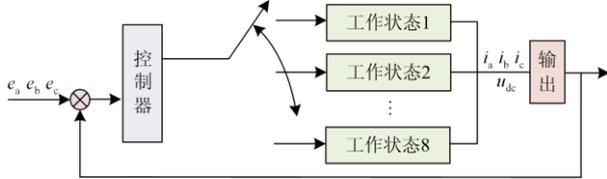


图 6 双向型 AC/DC 变换器切换模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of switching model of bidirectional AC/DC converter

2.3.2 DC/DC 变换器切换模态

DC/DC 变换器拓扑结构如图 7 所示。

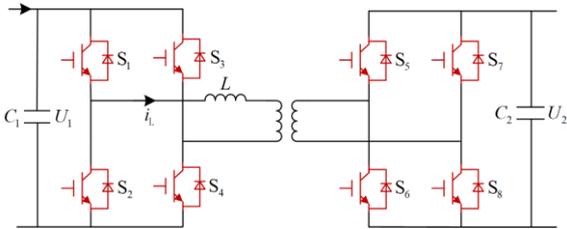


图 7 DC/DC 变换器拓扑结构

Fig. 7 DC/DC converter topology

建立描述 DC/DC 变换器状态开关函数 S_i 。

$$S_i = \begin{cases} 1 & \text{开关导通} \\ 0 & \text{开关断开} \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, 8 \quad (5)$$

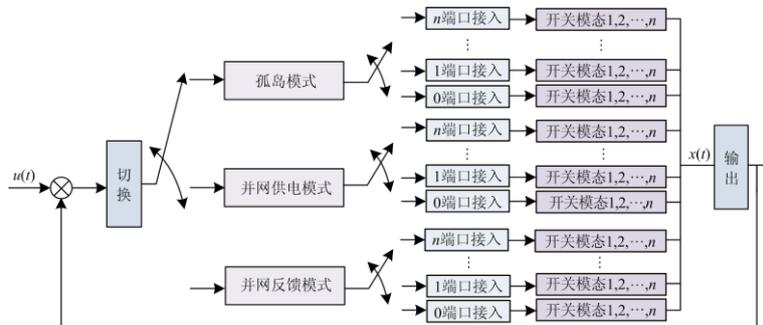


图 9 切换控制策略原理图

Fig. 9 Schematic diagram of switching control strategy

DC/DC 变换器存在 4 种工作状态, 如表 2 所示。

表 2 DC/DC 变换器工作状态

Table 2 Working state of DC/DC converter								
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	S ₇	S ₈
1	1	0	0	1	0	1	1	0
2	1	0	0	1	1	0	0	1
3	0	1	1	0	1	0	0	1
4	0	1	1	0	0	1	1	0

状态方程为

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = (S_{1j} - S_{3j}) U_1(t) - n(S_{5j} - S_{7j}) U_2(t) \\ C_1 \frac{du_1(t)}{dt} = \sum_{p=a,b,c} S_p i_p(t) - (S_{1j} - S_{3j}) i_L(t) \\ C_2 \frac{du_2(t)}{dt} = \frac{1}{n} (S_{1j} - S_{3j}) i_L(t) - \sum_{p=a,b,c} S_p i_p(t) \end{cases} \quad (6)$$

式中, $j = 0, 1$, $j = 0$ 时表示开关断开, $j = 1$ 时表示开关导通。

DC/DC 变换器切换模型示意图如图 8 所示。状态变量 $x(t) = (i_L, u_1, u_2)$, 输入变量 $u(t) = i_p (p = a, b, c)$ 。

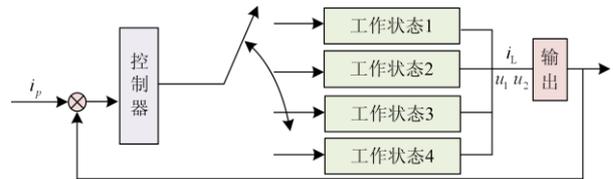


图 8 DC/DC 变换器切换模型示意图

Fig. 8 Schematic diagram of switching model of DC/DC converter

3 SST 终端能量路由器切换控制方法

3.1 切换控制器的原理结构

终端能量路由器切换控制策略原理图如图 9 所示。一级切换控制为 3 种模式的切换。二级切换控制各端口的接入, 对接入端口数量进行判断。三级切换对变换器中各个开关状态进行管理。

3.2 切换控制策略

3.2.1 一级切换控制

本文所设计一级切换策略流程图如图 10 所示。分布式电源发电小于终端负载耗电时，若储能电容 $SOC > 50\%$ 时进入孤岛模式， $SOC \leq 50\%$ 时能量路由器并网从电网获得电能供给终端；当 $SOC > 50\%$ 进入孤岛模式后， $SOC > 20\%$ 时维持在孤岛模式， $SOC \leq 20\%$ 时能量路由器并网从电网获得电能供给终端；分布式电源发电大于终端负载时，若储能电容 $20\% < SOC < 80\%$ ，则进入孤岛模式；当储能电容 $SOC > 80\%$ ，则能量路由器并网终端输送电能到电网；储能电容 $SOC < 20\%$ ，则能量路由器并网终端从电网获取电能。

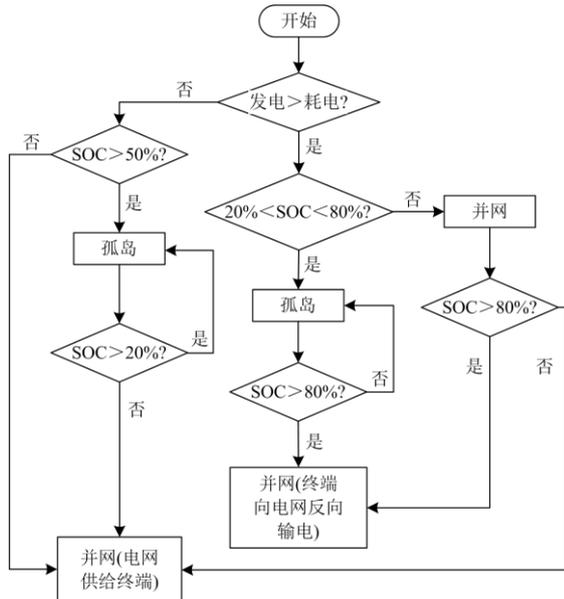


图 10 切换策略流程图

Fig. 10 Flow chart of switching strategy

切换信号 σ_1 的取值如式(7)， $\sigma_1 = 1$ 时切换至并网供电模式； $\sigma_1 = 0$ 时切换至孤岛模式； $\sigma_1 = -1$ 时切换至并网反馈模式。

$$\sigma_1 = \begin{cases} 1 \\ 0 \\ -1 \end{cases} \quad (7)$$

一级切换控制策略图如图 11 所示。

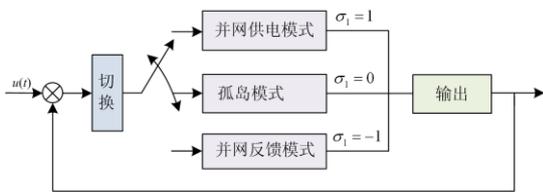


图 11 一级切换控制策略图

Fig. 11 Diagram of first level switching control strategy

3.2.2 二级切换控制

二级切换控制策略图如图 12 所示。二级切换控制对各端口是否接入进行控制，图 1 构架中详细介绍了各端口。当能量路由器处于孤岛模式时，配电网端口不接入；否则配电网端口接入。二级切换中需要对分布式能源端口、储能装置端口、负载端口 3 类端口进行接入判断。

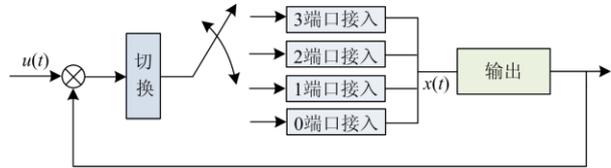


图 12 二级切换控制策略图

Fig. 12 Diagram of secondary switching control strategy

负载端口由人为调度，该负载需要使用则该端口接入能量路由器。

分布式电源由实际发电量决定。若分布式电源发电功率 $S_{dis} > 0$ ，则该端口接入能量路由器。

储能装置端口在负载所需功率 S_R 不等于发电功率 S_{dis} 与网端输入能量路由器功率 S_{Net} 之和时，储能装置端口接入能量路由器，否则不接入。

任意端口设备发生故障则由调度层直接断开该端口。

二级切换控制各端口的接入，其可能状态数为 $k = C_3^0 + C_3^1 + C_3^2 + C_3^3 = 8$ 。

3.2.3 三级切换控制

三级切换对各端口开关进行控制。如表 1 和表 2 所示：DC/DC 变换器存在 4 种工作状态。AC/DC 变换器存在 8 种工作状态。SVPWM 调制电压利用率高于 SPWM 15% 左右，且采用 SVPWM 调制输出波形谐波含量更低、开关损耗小、计算简单、动态响应快^[25-26]。在文献[7]的基础上，本文提出采用 SVPWM 调制来对开关模式进行控制。故系统处于正常运行状态时，在 SVPWM 调制下对开关状态进行切换。

输入量为 U_{ref} 、 U_α 、 U_β 、 T_s 。其中： U_{ref} 为参考电压矢量； U_α 、 U_β 为 U_{ref} 在 α 轴和 β 轴的分量； T_s 为采样周期。令

$$\begin{cases} U_{ref1} = \frac{1}{2}U_\beta \\ U_{ref2} = \frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{1}{2}U_\beta \\ U_{ref3} = -\frac{\sqrt{3}}{2}U_\alpha - \frac{1}{2}U_\beta \end{cases} \quad (8)$$

若参考电压矢量 $U_{ref1} > 0$, 则 $A=1$, 否则 $A=0$; 若 $U_{ref2} > 0$, 则 $B=1$, 否则 $B=0$; 若 $U_{ref3} > 0$, 则 $C=1$, 否则 $C=0$ 。

A、B、C组合方式有8种, 结合以上分析, A、B、C不会同时为0或1。故A、B、C实际组合方式为6种, 令

$$S = A + 2B + 4C \quad (9)$$

S的取值与扇区的6部分相对应, 如图13所示。图中括号数值与式(9)相对应。

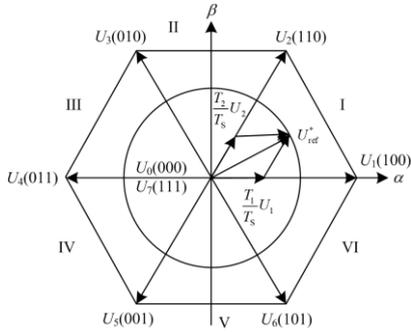


图13 参考电压扇区判断图

Fig. 13 Reference voltage sector judgment chart

如图13所示, 以扇区I为例。将参考矢量 U_{ref}^* 用相邻空间矢量 U_1 、 U_2 及零矢量 U_0 表示, 如式(10)。

$$\int_0^{T_s} U_{ref}^* dt = \int_0^{T_1} U_1 dt + \int_{T_1}^{T_1+T_2} U_2 dt + \int_{T_1+T_2}^{T_s} U_0 dt \quad (10)$$

根据正弦定律求解可得

$$\begin{cases} T_1 = mT_s \sin(\pi/3 - \theta) \\ T_2 = mT_s \sin \theta \\ T_3 = T_s - T_1 - T_2 \end{cases} \quad (11)$$

式中: m 为 SVPWM 调制系数; T_1 、 T_2 为采样周期内 U_{ref}^* 分别作用在空间矢量 U_k 、 U_{k+1} ($k=1,2,L,6$; 如果 $k=6$, 令 $k+1=1$) 上的时间; T_3 为采样周期内 U_{ref}^* 作用在空间矢量 U_0 上的时间; θ 为 U_{ref}^* 与 U_k 的夹角。根据式(11)计算出 T_1 、 T_2 和 T_3 , 即可确定各个开关器件的开关状态的持续时间, 也称开关状态的作用时间 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 。根据 T_{cm1} 、 T_{cm2} 、 T_{cm3} 可得到 SVPWM 输出脉冲。

4 仿真

4.1 仿真模型搭建

为验证本文所提切换控制策略在平稳切换、快速切换和维持系统稳定运行等方面的有效性, 在 Matlab/Simulink 平台搭建基于 SST 的终端路由器切换控制模型。主要参数设置如表3所示。

图14为SOC变化示意图。以分布式电源发电

大于终端负载耗电为例对其切换过程进行仿真, 仿真过程如下:

- 1) $t=0.3$ s 时, 设置 SOC 值为 10%;
- 2) $t=0.35$ s 时, 设置 SOC 值为 19.9%;
- 3) $t=0.4$ s 时, 设置 SOC 值为 20.1%;
- 4) $t=0.5$ s 时, 设置 SOC 值为 70%;
- 5) $t=0.7$ s 时, 设置 SOC 值为 90%;

表3 系统参数

Table 3 System parameters

参数	数值
线电压	380 V
频率	50 Hz
电感	5 mH
电容	100 μ F
用户端负载	10 kW

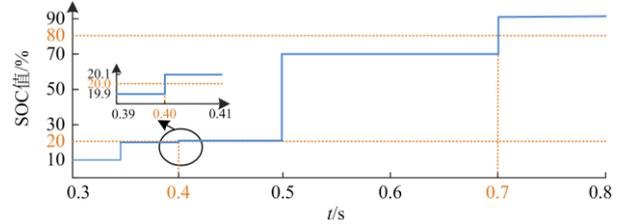


图14 SOC变化示意图

Fig. 14 Schematic diagram of SOC change

4.2 网端仿真分析

网端仿真波形如图15所示。图15(a)为切换控制下网端功率, 结合图14与图15(a)可以看出, 0.35 s 时 SOC 由 10% 切换为 19.9%, 此时网端吸收功率为 -10 kW, 能量路由器保持在网端供能模式; 0.4 s 时 SOC 由 19.9% 切换为 20.1%, 此时网端功率由 -10 kW 变为 0 kW, 网端停止向终端供能, 能量路由器由网端供能模式切换到孤岛模式。0.5 s 时 SOC 由 19.9% 切换到 70%, 此时网端功率为 0 kW, 能量路由器保持在孤岛模式。0.7 s 时 SOC 由 70% 切换到 90%, 此时网端吸收功率为 10 kW, 能量路由器由孤岛模式切换到反馈模式。由上述切换过程可以看出, SOC 值与所设置切换条件差值较小或较大时, 均不会造成切换系统误动作。由图15(a)可以看出, 模式切换前后, 功率波形发生较小波动, 随后在切换控制的作用下较快地恢复稳定。采用切换控制来对终端能量路由器进行控制, 发生切换到恢复稳定时间 < 0.001 s, 切换反应迅速。

网端电压、电流如图15(b)和图15(c)所示, 网端电压很好地维持在 311 V 左右, 网侧电流在并网供电模式时维持在 20 A 左右, 0.4 s 由并网供电模式切换到孤岛模式时, 网侧电流减少至 0 周围波动, 0.7 s 由孤岛模式切换到并网反馈模式时, 电流恢复

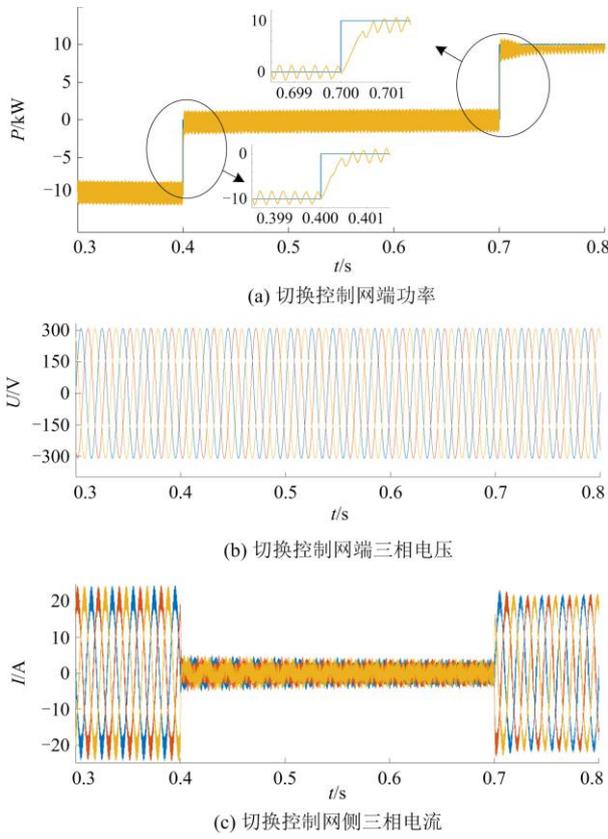


图 15 网端仿真波形

Fig. 15 Network port simulation waveform

到 20 A 左右, 但方向与并网供电模式相反, 此时由终端向电网供电。可以看出电压、电流在切换前后很快达到稳定。

将本文所提切换控制与传统 PID 控制相比较。传统控制切换仿真结果如图 16 所示, PID 控制下在切换后 0.005 s 仍未恢复稳定, 且存在超调现象。对比可得, 本文所提切换控制系统的切换反应迅速且较快达到稳定。

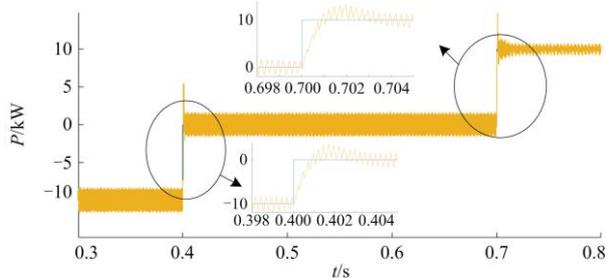


图 16 传统控制功率仿真波形

Fig. 16 Simulation waveform of traditional control power

图 17 为传统 PID 控制下的电流切换仿真图, 在 0.4 s 与 0.7 s 切换时刻电流突变至 40 A 以上。这种电流的突变会影响电网的安全运行。

4.3 用户端仿真分析

用户端仿真波形如图 18 所示。图 18(a)为切换控制下用户端功率, 用户端输入总功率较稳定地维持在 10 kW 左右。用户端电压、电流如图 18(b)和图 18(c)所示, 用户端电压很好地维持在 311 V 左右, 用户端电流很好地维持在 20 A 左右。且切换过程中电压电流波形良好, 电流几乎没有发生超调。可以看出采用本文所提切换控制来对能量路由器进行控制的动静态性能较好。

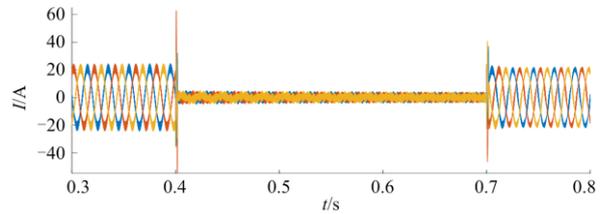


图 17 传统控制网侧电流仿真波形

Fig. 17 Current simulation wave at the side of traditional control network

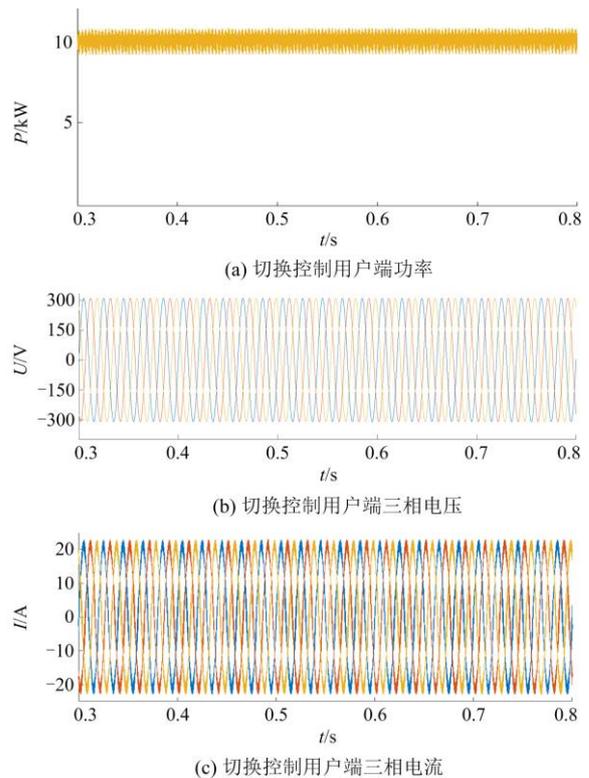


图 18 用户端仿真波形

Fig. 18 User simulation waveform

图 19 为 Simulink/powergui/FFT 得出的频谱分析, 谐波畸变率为 4.58% < 5%。可以得出: 采用切换控制, 输入电网波形良好, 输出电压波形畸变较小, 且谐波含量较小。

仿真结果表明, 切换控制策略应用于终端能量路由器可以实现迅速切换、平稳切换且能保持功率的平衡及电压电流的波形良好与稳定。

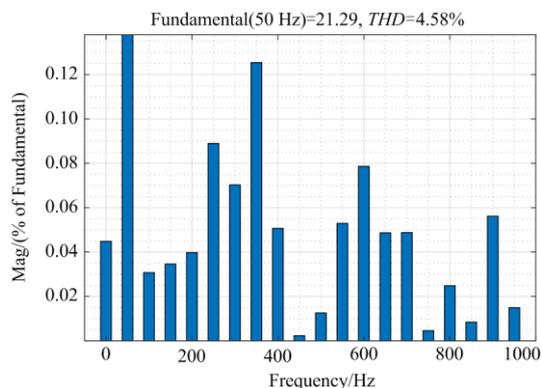


图 19 频谱分析

Fig. 19 Spectrum analysis

5 结论

为了优化双向电网趋势下终端能量路由器双向传输功能与切换控制性能, 本文搭建了与配电网相连接的终端能量路由器运行模型, 并基于混成切换系统提出了切换控制策略。混成切换系统将复杂的大系统分解为线性小系统, 能更加精确地对系统进行描述。仿真结果表明混成切换系统控制下的路由器进行切换时有较好的动态与静态性能。网端电能经文中所述终端能量路由器输送到用户端, 可以满足用户端负荷需求且电压电流波形稳定良好。处于反馈模式时, 用户端反向输入电网的电压谐波含量小于 5%, 符合国家公共电网谐波标准, 能很好地满足终端用户向电网反向输电的功能。在不同的模式切换过程中, 有效地实现了快速切换与平稳切换。

通过对不同控制策略下的仿真实验, 验证了本文所提控制的可行性与有效性。基于文中所述终端能量路由器, 终端用户可获得稳定良好的电能, 且用户反馈至网端电能谐波含量较低。基于该控制策略, 终端能量路由器在切换时具备较好的动静态反应性能。采用本文所提切换控制方法有利于电能质量的优化。用户在满足自身用电需求的情况下, 将满足并网要求的多余电能反向供给电网, 可以减少电费开支。电网端可以减轻负荷压力。有利于能源的优化配置。同时文中所述切换控制方法也可应用于其他电力电子电路。未来需要进行的工作是将本文所提控制方法结合不同的切换律针对各类电力电子电路进行深入研究及融合。

参考文献

[1] 赵争鸣, 冯高辉, 袁立强, 等. 电能路由器的发展及其关

键技术[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3823-3834.

ZHAO Zhengming, FENG Gaohui, YUAN Liqiang, et al. The development and key technologies of electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3823-3834.

[2] 马文忠, 古丽帕丽·赛力江, 周冠宇, 等. 向海岛电网供电的 MMC-HVDC 有源/无源切换控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 157-165.

MA Wenzhong, GULIPALI Sailijiang, ZHOU Guanyu, et al. Active/passive switching control strategy for MMC-HVDC connected to an island power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 157-165.

[3] 邓雪梅. 日本数字电网计划[J]. 世界科学, 2013, 7: 9-19.

[4] 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): 138-144.

[5] 郭慧, 汪飞, 张笠君, 等. 基于能量路由器的智能型分布式能源网络技术[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3314-3325.

GUO Hui, WANG Fei, ZHANG Lijun, et al. Technologies of energy router-based smart distributed energy network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3314-3325.

[6] 王建元, 张泽强, 宋月航. 户用型能量路由器控制策略研究[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 174-179.

WANG Jianyuan, ZHANG Zeqiang, SONG Yuehang. Research on control strategy of household energy router[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 174-179.

[7] 宗升, 何湘宁, 吴建德, 等. 基于电力电子变换的电能路由器研究现状与发展[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(18): 4559-4570.

ZONG Sheng, HE Xiangning, WU Jiande, et al. Overview of power electronics based electrical energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(18): 4559-4570.

[8] 张明锐, 宋柏慧, 王佳莹, 等. 基于模型预测控制的固态变压器控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 129-137.

ZHANG Mingrui, SONG Bohui, WANG Jiaying, et al. Control strategy for solid state transformer based on model predictive control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 129-137.

[9] 王睿驰. 能量—信息一体化的电能路由器关键技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

WANG Ruichi. Research on key technologies of power/data integration energy router[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2019.

[10] 顾后生, 李霞林, 郭力, 等. 多直流微电网群柔性互联与控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(4): 1-8.

GU Housheng, LI Xialin, GUO Li, et al. Flexible inter-connection and control of multiple DC microgrid clusters[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(4): 1-8.

[11] 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.
- [12] 周力. 小型能源路由器的电路拓扑与控制策略研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2017.
ZHOU Li. Research on circuit topology and control strategy of small energy router[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2017.
- [13] 卫璐璐, 刘天保, 刘立群, 等. 新型多端能量路由器的结构及控制策略研究[J]. 太原科技大学学报, 2020, 41(3): 183-189.
WEI Lulu, LIU Tianbao, LIU Liqun, et al. Research on the structure and control strategy of a novel multi-terminal energy router[J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology, 2020, 41(3): 183-189.
- [14] 潘本仁, 王和春, 张妍, 等. 含分布式电源的主动配电网重构策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 102-107.
PAN Benren, WANG Hechun, ZHANG Yan, et al. Study on an active distribution network reconstruction strategy with distributed power supply[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 102-107.
- [15] 曾鸣, 杨雍琦, 李源非, 等. 能源互联网背景下新能源电力系统运营模式及关键技术初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(3): 681-691.
ZENG Ming, YANG Yongqi, LI Yuanfei, et al. The preliminary research for key operation mode and technologies of electrical power system with renewable energy sources under energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(3): 681-691.
- [16] 李子欣, 高范强, 赵聪, 等. 电力电子变压器技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1274-1289.
LI Zixin, GAO Fanqiang, ZHAO Cong, et al. Research review of power electronic transformer technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1274-1289.
- [17] 郑若楠, 韩华, 李国杰, 等. 逆变器串并联型微电网的一种本地主从协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(23): 47-56.
ZHENG Ruonan, HAN Hua, LI Guojie, et al. A local master-slave coordinated control strategy for series-parallel inverter microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(23): 47-56.
- [18] 侯冰冰. 能源路由器中固态变压器的参数设计与仿真分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2019.
HOU Bingbing. Parameter design and simulation analysis of solid state transformer in energy router[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2019.
- [19] 文武松, 赵争鸣, 袁立强, 等. 电能路由器公共高频母线超瞬态过程机理及抑制措施[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5283-5293.
WEN Wusong, ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, et al. Mechanism and suppression strategy of the ultra-transient behavior of high-frequency-bus in electric energy router[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5283-5293.
- [20] CHEN H, IYER A, HARLEY R, et al. Dynamic grid power routing using controllable network transformers (CNT) with decoupled closed-loop controller[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(3): 2361-2372.
- [21] 刘海军, 李刚, 王志凯, 等. 面向中高压智能配电网的电力电子变压器建模方法与控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 85-93.
LIU Haijun, LI Gang, WANG Zhikai, et al. Research on medium and high-voltage smart distribution grid oriented power electronic transformer modeling and control strategies[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 85-93.
- [22] 王亮. 能源互联网中高频交流固态变压器系统关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
WANG Liang. Research on key technologies of high-frequency AC solid-state transformer system in energy internet[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2017.
- [23] 郑宏宇. 基于混杂自动机模型的三相并网逆变器切换控制策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2018.
ZHENG Hongyu. Research on control strategy of three-phase cascaded grid-connected inverter[D]. Tianjin: Tianjin University, 2018.
- [24] 颜亮. 固态能量路由器主电路拓扑和控制方法研究[D]. 长沙: 长沙理工大学, 2017.
YAN Liang. Research on control method of flexible variable mode power quality conditioner[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2017.
- [25] 蒋诗百, 杨丽娜, 刘权. 考虑柔性负荷的能源互联网园区综合能源优化研究[J]. 电测与仪表, 2020, 57(16): 83-88.
JIANG Shibai, YANG Lina, LIU Quan. Research on comprehensive energy optimization of energy interconnected parks considering flexible load[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(16): 83-88.
- [26] 胡鹏飞, 朱乃璇, 江道灼, 等. 柔性互联智能配电网关键技术研究进展与展望[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 2-12.
HU Pengfei, ZHU Naixuan, JIANG Daozhuo, et al. Research progress and prospects of key technologies of flexible interconnected smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 2-12.

收稿日期: 2021-08-22; 修回日期: 2022-02-09

作者简介:

王思尹(1998—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为能源并网与电力电子设备等; E-mail: 815218071@qq.com

粟时平(1963—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力系统监控、高电压防护与接地、电力电子仪器仪表、精密加工技术等。E-mail: sushiping@126.com

(编辑 周金梅)