

DOI: 10.7667/PSPC160950

# 适用于高频连接方式的直流配电系统分层逻辑控制

王振浩<sup>1</sup>, 成龙<sup>1</sup>, 孙福军<sup>2</sup>, 李国庆<sup>1</sup>

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 国网黑龙江电力有限公司, 黑龙江 哈尔滨 150090)

**摘要:** 基于模块化的高频隔离功率变换系统为基础, 搭建了含有光储系统和工频负载的直流配电系统实验模型。设计了实验模型的3种运行模式, 并通过对系统电压、功率关系及各并网接口模块工作特性的分析, 提出一种以直流母线电压为主要控制量的分层逻辑控制系统。分层逻辑控制系统分为数据采集、模式识别、逻辑组合和指令执行4个控制层, 各层间无需互联通信, 通过各并网接口模块所离散出的12个子控制器, 以就地控制方式保证系统功率平衡、电压稳定及各接口模块间的协调配合。最后通过Matlab/Simulink仿真实验, 验证了所提出的控制策略在直流配电系统运行控制中的正确性和有效性。

**关键词:** 直流配网; 高频隔离; 功率变换系统; 直流母线电压; 分层逻辑控制; 电压平衡控制

## Hierarchical logic control strategy for high frequency isolated DC distribution system

WANG Zhenhao<sup>1</sup>, CHENG Long<sup>1</sup>, SUN Fujun<sup>2</sup>, LI Guoqing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. State Grid Heilongjiang Electric Power Company Limited, Harbin 150090, China)

**Abstract:** Based on modularized high frequency isolation power conversion system, an experimental model of DC distribution system with photovoltaic, energy storage system and AC loads is built. Three system operation modes are designed and a hierarchical logic control system with the main control variable of DC bus voltage is proposed through analyzing system P-V relationships and operating characteristics of various network interface modules. The hierarchical logic control system is divided into 4 control layers, including data acquisition, pattern recognition, logic combination and instruction execution. Between the layers, it takes a way of local control to ensure the system power balance, voltage stability and coordination between various interface modules through the discrete out of 12 sub-controllers without internet communication. Finally, Matlab/Simulink experiments are conducted to verify the validity and effectiveness of the proposed control strategy in DC distribution system operation and control.

This work is supported by Technology Development Plan of State Grid Corporation of China (No. [2015]90 and No. [2015]457).

**Key words:** DC distribution; high frequency isolation; power conversion system; DC bus voltage; hierarchical logic control; voltage balance control

## 0 引言

在常规能源供应逐渐紧张、环境问题日益严峻的今天, 探索大电网与分布式发电系统的结合是节省投资、降低能耗、提高系统安全性和灵活性的有效方法<sup>[1-6]</sup>。与传统工频配电系统相比, 直流配电系统不涉及无功调节及对电压的频率和相位进行跟踪

等问题<sup>[7-9]</sup>, 可控性和可靠性大大提高。同时, 随着现代电力电子技术的快速发展, 先进功率器件不断更新换代, 研究、开发基于高频隔离(High Frequency Isolation, HFI)的大功率、高功率密度的功率变换系统(Power Conversion System, PCS)将对推动智能配电技术的发展影响深远<sup>[10-13]</sup>。因此, 如何通过基于HFI的直流配电系统实现交流大电网与分布式电源的连接逐渐成为产学研各界研究的热点。

为了使直流配电系统所整合的各类不同性质的结构单元(如分布式电源、储能设备及相关并网接

基金项目: 国家电网公司科技发展计划项目([2015]90号, [2015]457号)

口电路等)作为一个有机整体及时响应负载需求,就必须对它们进行合理的协调控制<sup>[14-15]</sup>,形成可行、可靠、高效的综合能量管理机制,保证系统的电压稳定和对负载的高质量供电。文献[16]对智能电网中 HFI-PCS 的关键技术和意义进行了全面阐述,但未提出具体的控制策略。文献[11]设计了用于柔性直流配电的 HFI 链式固态变压器的工作模式,实现了对变压器出口电压、功率平衡控制,但缺乏系统级的整体构架和运行控制分析。文献[14,17]分别提出了直流微网各接口模块间的协调控制策略,保证了系统稳定和运行模式的平滑切换,但都以传统工频变压器和 AC/DC 变换电路实现与主网的电压匹配和电气隔离。文献[18]针对新能源直流微网提出了一种新型层次控制构架,但需要依靠互联通信实现各层间的协调控制。

根据目前的国内外研究现状,本文以基于 HFI-PCS 的光储直流配电系统为实验模型,提出一种分层逻辑控制方法,无需互联通信,实现模型中各接口模块的实时协调控制,保证系统功率平衡、电压稳定及各运行模式间的平滑切换,并使系统具备“即插即用”功能<sup>[19]</sup>。

## 1 系统结构方案

基于 HFI 的交直流功率变换系统结构单元如图 1 所示。它通过电网侧整流馈电模块和直流侧双主动全桥(Dual-Active-Bridge, DAB)高频 DC/DC 变换模块实现大电网与直流配电系统间的电压变换和能量传输。

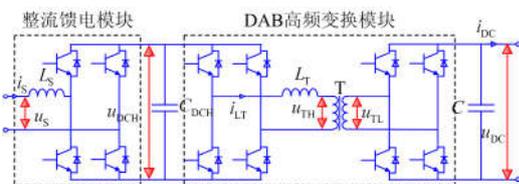


图 1 HFI-PCS 结构单元

Fig. 1 Structural unit of HFI-PCS

将  $n$  个此结构单元级联后,结合光储系统、工频负载及逆变模块、储能接口模块和光伏接口模块构成本文所研究的直流配电系统实验模型,其结构如图 2 所示。

## 2 系统运行模式及切换条件

### 2.1 系统运行模式

本文在直流配电系统与大电网连接的前提下,根据实验模型中控制直流母线电压的不同换流器模块,将系统的运行模式设计为以下 3 种情况。

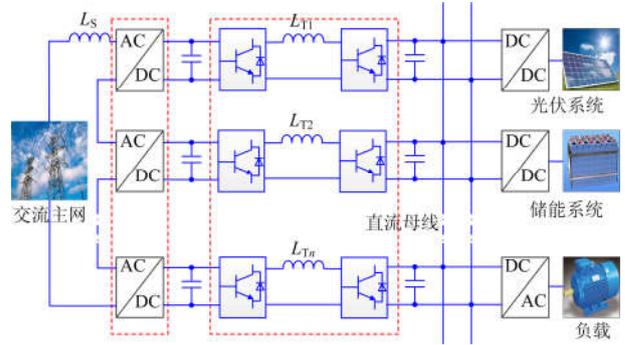


图 2 直流配电系统实验模型

Fig. 2 Experimental model of DC distribution system

#### 1) 模式 1: 主网补给运行模式

当直流配网内光伏系统出力不足以供给负载时,功率缺额由交流主网提供,光伏系统工作在最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)状态。此时,由 HFI-PCS 维持整个配电系统电压稳定和功率平衡。

#### 2) 模式 2: 储能协调运行模式

在此模式下,储能系统(Energy Storage System, ESS)裕度充足,能够自由地吸收和释放电能。此时,由 ESS 负责平抑光伏出力波动,维持直流母线电压稳定,光伏系统工作在 MPPT 状态。事实上,储能协调运行模式是直流配电网最期望的运行工作模式。

#### 3) 模式 3: 光伏减载运行模式

当直流配网内光伏系统出力过剩,超出本地负载和交流主网的用电需要,且 ESS 以最大能力吸收电能或已充满,此时光伏系统应脱离 MPPT 状态,限制出力,以维持直流母线电压稳定。

### 2.2 切换条件

该直流配电系统实验模型的功率关系为

$$\sum_{j=1}^l P_{PVj} + P_S = \sum_{h=1}^m P_{Eh} + P_L + P_C \quad (1)$$

式中:  $P_{PVj}$  为光伏单元输出功率;  $P_S$  为直流配网与大电网交换功率;  $P_{Eh}$  为储能单元充放电功率;  $P_L$  为负载功率;  $P_C$  为级联 HFI-PCS 低压直流侧电容充电总功率;  $l, m$  分别为光伏单元和储能单元数量。

直流母线电压变化时, HFI-PCS 低压直流侧电容  $C_i$  储存总能量的变量  $\Delta E_{DC}$  为

$$\Delta E_{DC} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n C_i (u_{DCN}^2 - u_{DC}^2) \quad (2)$$

式中:  $u_{DCN}, u_{DC}$  分别为设计直流母线电压和直流母线实际电压;  $n$  为 HFI-PCS 结构单元级联数量。

由式(1)可得

$$\Delta E_{DC} = T \left( \sum_{j=1}^l P_{PVj} + P_S - \sum_{h=1}^m P_{Eh} - P_L \right) \quad (3)$$

式中,  $T$  为系统运行时间。

联立式(2)、式(3)可得

$$u_{DC}^2 = u_{DCN}^2 - \frac{2T}{\sum_{i=1}^n C_i} \left( \sum_{j=1}^l P_{PVj} - P_L \right) + \frac{2T}{\sum_{i=1}^n C_i} \left( \sum_{h=1}^m P_{Eh} - P_S \right) \quad (4)$$

由式(4)可见, 光伏系统出力变化和负载容量变化都会引起直流母线电压波动。因此, 为保证直流配电系统电压稳定, 必须以直流母线电压  $u_{DC}$  为依据, 结合 ESS 容量, 对各接口模块进行协调控制。系统电压功率关系如图 3 所示。

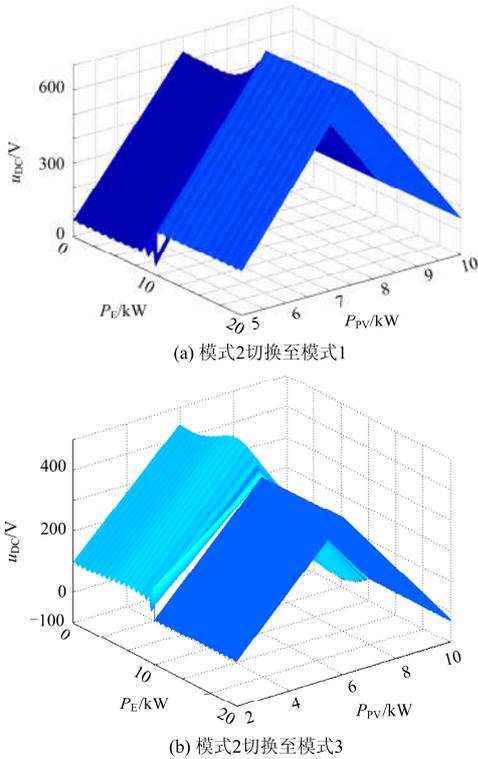


图 3 系统电压功率关系示意图

Fig. 3 Diagram of relationship between voltage and power

综上所述, 系统运行模式切换流程如图 4 所示。图中:  $u_H, u_L$  分别为方案中设定的电压高阈值和低阈值;  $E_E$  为 ESS 容量;  $E_{E_{max}}, E_{E_{min}}$  分别为方案中设定的 ESS 容量上下限。

### 3 系统分层逻辑控制策略设计

#### 3.1 系统主控制逻辑设计

根据第 3.1 节设计的系统运行模式可知, 直流

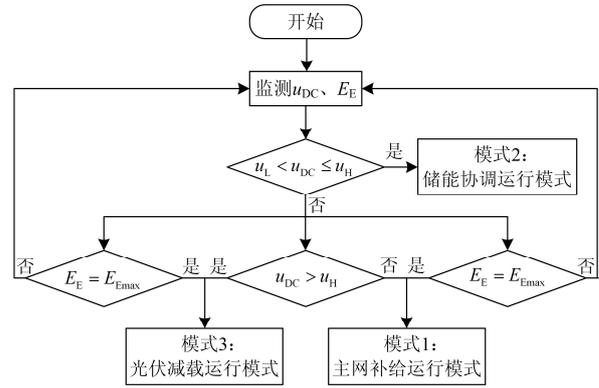


图 4 系统运行模式切换流程图

Fig. 4 Flowchart of system operating mode switching

配电系统中所包含的整流馈电模块、DAB 高频变换模块、逆变模块、储能接口模块及光伏接口模块在不同模式下的工作状态和控制量均不同, 为了使系统内各模块能够协调工作, 并实现各运行模式间的平滑切换, 本文设计了一种适用于高频连接方式的直流配网分层逻辑控制策略, 如图 5 所示。

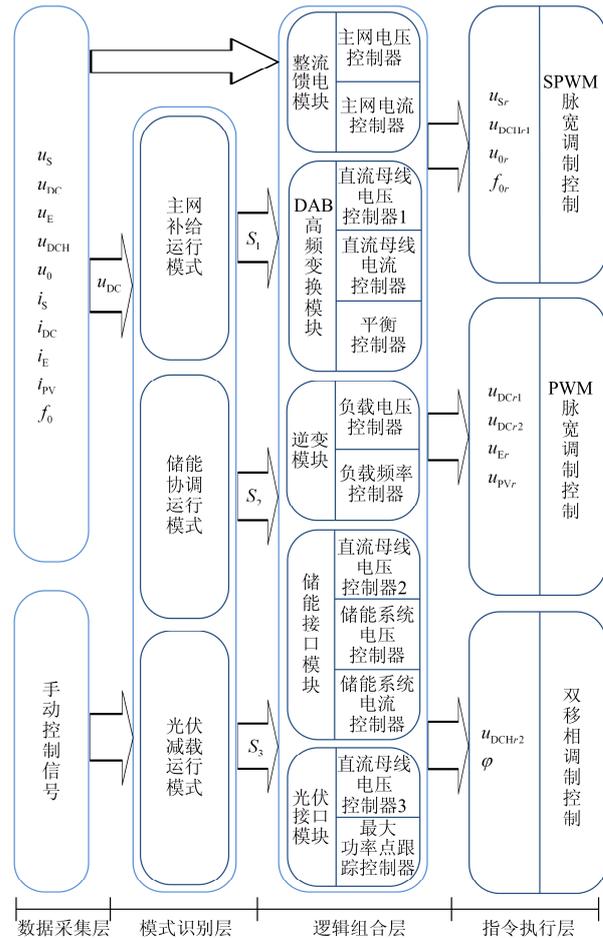


图 5 直流配电系统分层逻辑控制体系

Fig. 5 Hierarchical logic control system of DC distribution system

图 5 中:  $S_1 \sim S_3$  分别代表所设计的 3 种系统运行模式;  $u_s, i_s$  分别为主网出口电压和电流;  $u_{DCH}$  为 DAB 高频变换模块高压侧电压;  $u_0, f_0$  分别为负载电压和频率;  $i_{DC}$  为直流母线电流;  $u_E, i_E$  分别为 ESS 出口电压和电流;  $i_{PV}$  为光伏系统出口电流;  $u_{Sr}$  为模式 2 和模式 3 下整流馈电模块输出的主网出口电压调制信号;  $u_{DCHr1}, u_{DCHr2}$  分别为模式 1 下整流馈电模块输出的直流侧电压调制信号和 DAB 高频变换模块输出的高压侧电压调制信号;  $u_{DCr1}, u_{DCr2}$  分别为模式 2 下储能接口模块和模式 3 下光伏接口模块输出的直流母线电压调制信号;  $u_{0r}, f_{0r}$  分别为逆变模块输出的负载电压和频率调制信号;  $u_{Er}$  为储能接口模块在模式 1 和模式 3 下的出口电压调制信号;  $u_{Pv,r}$  为光伏接口模块在模式 1 和模式 2 下的出口电压调制信号;  $\varphi$  为隔离变压器 T 两侧交流端电压  $u_{TH}$ ,  $u_{TL}$  的移相角。

表 1 系统各模块具体控制量

Table 1 Specific control volumes of each module

运行模式	控制量				
	整流馈电模块	DAB 变换模块	逆变模块	储能接口模块	光伏接口模块
模式 1	$i_s$	$u_{DC}, i_{DC}, u_{DCH}$	$u_0, f_0$	$u_E, i_E$	$i_{PV}$
模式 2	$u_s$	$u_{DCH}$	$u_0, f_0$	$u_{DC}$	$i_{PV}$
模式 3	$u_s$	$u_{DCH}$	$u_0, f_0$	$u_E, i_E$	$u_{DC}$

在主网补给运行模式(模式 1)下, 主网出口电流  $i_s$  由整流馈电模块控制, 直流母线电压  $u_{DC}$ 、电流  $i_{DC}$  由 DAB 高频变换模块控制, 储能接口模块控制 ESS 输出电压  $u_E$  和输出电流  $i_E$ , 光伏系统工作在 MPPT 状态; 在储能协调运行模式(模式 2)下, 整流馈电模块控制主网出口电压  $u_s$ , 直流母线电压  $u_{DC}$  由储能接口模块控制, 光伏系统工作在 MPPT 状态; 在光伏减载运行模式(模式 3)下, 整流馈电模块控制主网出口电压  $u_s$ , 储能接口模块控制 ESS 输出电压  $u_E$  和电流  $i_E$ , 光伏系统脱离 MPPT 状态, 由光伏接口模块控制直流母线电压  $u_{DC}$  稳定。3 种工作模式下, HFI-PCS 交流侧各串联单元电压平衡始终由 DAB 高频变换模块控制, 负载电压  $u_0$ 、频率  $f_0$  始终由逆变模块控制。

### 3.2 系统各接口模块控制策略设计

将实验模型的整体控制策略按照整流馈电模块、DAB 高频变换模块、逆变模块、储能接口模块及光伏接口模块 5 部分分别进行设计, 在这 5 个模块所离散出的 12 个子控制器中, 除平衡控制器外, 均通过比例积分(Proportion Integral, PI)环节实现控制目标。各模块具体控制策略如图 6 所示。

模式识别层通过来自数据采集层的电压、电流等信号或系统掉电时的手动控制判断实验模型的工作模式, 并输出相应的逻辑控制信号。逻辑组合层再根据输入的逻辑控制信号判断各控制模块的运行状态, 进行合理的逻辑组合, 达到不同工作模式下稳态和暂态运行的控制目标, 同时结合参考信号和数据采集层的实测信号, 按照特定的算法, 得到脉冲调制信号, 输入指令执行层, 最终由指令执行层发出相应的开关器件驱动脉冲。

为避免采取集中控制和上层能量调度过程中某一环节出错所可能导致的系统崩溃等问题<sup>[20]</sup>, 本研究中所提出的直流配网实时协调控制策略, 无需互联互通, 采取就地控制方式, 及时响应系统内的功率平衡需求, 保证系统电压稳定。不同运行模式下系统中各模块具体控制量如表 1 所示。

图 6 中:  $u_{0rms}$  为负载电压有效值;  $\Delta i_{DCHi}$  为 DAB 高频变换单元高压侧电流校正量; 标“\*”的变量为所对应变量的参考值。

整流馈电模块通过闭环 SPWM 调制实现功率的双向传输。如图 6(a)所示, 在模式 1 下, 主网电流控制器选通, 整流馈电模块工作在可控整流状态。

其中, 在主网电流控制器出口叠加相应电压  $u_s$ , 能够有效抑制系统电压波动对输出电流的影响。在模式 2 或模式 3 下, 主网电压控制器选通, 整流馈电模块工作在逆变状态。特别地, 由于此时没有主网电压支撑, 系统需自生成主网出口电压参考值  $u_s^*$ 。

DAB 高频变换模块主要负责维持 HFI-PCS 高压直流侧各串联单元电压平衡<sup>[21]</sup>, 同时, 为了抑制系统中的环流, 采用双移相模式<sup>[22-23]</sup>进行调制, 如图 6(b)所示。在模式 1 下, 直流母线电压控制器 1 和直流母线电流控制器选通。通过控制经 PI 环节得到的移相角  $\varphi_i$  的调制值, 就能在连接电抗  $L_{Ti}$  和隔离变压器  $T_i$  上产生近似于梯形波的高频交变电流  $i_{LTi}$ 。设其在一个开关周期内的平均值为  $I_{LTi}$ , 则

$$I_{LTi} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} i_{LTi} d\theta = \frac{\varphi_i (\pi - |\varphi_i|) u_{DC}}{\pi \omega L_{Ti}} \quad (5)$$

式中:  $\omega$  为开关频率;  $-\pi/2 \leq \varphi \leq \pi/2$ 。

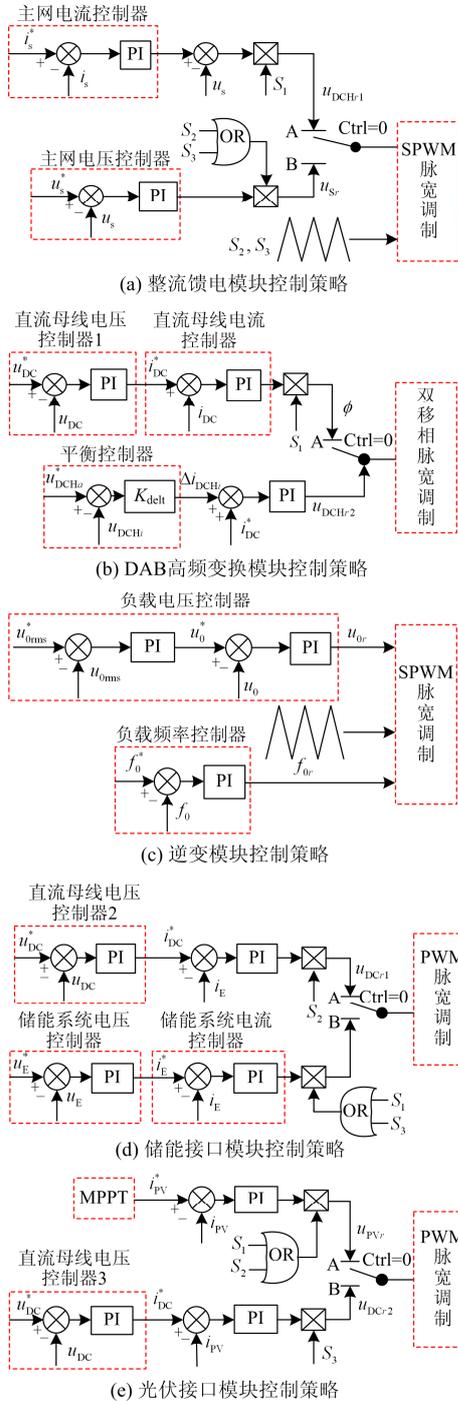


图 6 系统各模块控制策略结构图

Fig. 6 Control strategy structure chart for system modules

由式(5)可知,通过控制移相角  $\phi_i$ ,便可控制  $I_{LTi}$  的大小和方向,实现 DAB 高频变换模块两端的电压变换和功率的双向传输。

在设计 DAB 高频变换模块所包含的电压平衡控制策略时,输入的参考电压  $u_{DCHa}^*$  应为考虑  $n$  个 HFI-PCS 结构单元级联情况下的高压直流侧电压参

考值的均值,由式(6)计算得到。

$$u_{DCHa}^* = \frac{u_{DCH1}^* + u_{DCH2}^* + \dots + u_{DCHn}^*}{n} \quad (6)$$

式中,  $u_{DCHi}^*$  为第  $i(i=1, 2, \dots, n)$  个级联 DAB 高频变换模块高压侧电压参考值。

校正量  $\Delta i_{DCHi}$  通过比例控制参数  $K_{delt}$  由式(7)计算得到。

$$\Delta i_{DCHi} = K_{delt} (u_{DCHa}^* - u_{DCHi}) \quad (7)$$

$$\Delta i_{DCH1} + \Delta i_{DCH2} + \dots + \Delta i_{DCHn} = 0 \quad (8)$$

由式(8)可知,电流校正量之和为零,因此 DAB 高频变换模块高压侧均压控制对直流母线电压控制没有影响。

逆变模块采用闭环 SPWM 控制,如图 6(c)所示。其负载电压控制器采取的有效值外环保证负载电压波形的幅值更接近参考值,瞬时值内环保证负载电压波形更接近正弦波,减小波形畸变。负载频率参考值  $f_0^*$  取 50 Hz。

储能接口模块和光伏接口模块均采用闭环 PWM 调制模式,分别在模式 2 和模式 3 下负责维持直流母线电压稳定,如图 6(d)、图 6(e)所示。

## 4 系统实验模型的仿真分析

### 4.1 系统实验模型参数

为验证所设计的适用于高频连接方式的直流配电系统分层逻辑控制策略的有效性,本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台,以图 2 所示结构为基础搭建了系统实验模型,其主要参数如表 2 所示。

表 2 系统实验模型参数

Table 2 Parameters of experimental model

实验模型参数	数值
设计主网出口电压 $u_{SN}/V$	600
设计直流母线电压 $u_{DCN}/V$	800
设计负载电压 $u_{0N}/V$	380
设计负载频率 $f_{0N}/Hz$	50
主网最大输出功率 $P_{S0max}/kW$	60
储能系统最大输出功率 $P_{E0max}/kW$	15
储能系统最大吸收功率 $P_{E1max}/kW$	12
光伏系统最大输出功率 $P_{PV0max}/kW$	21
最大负载功率 $P_{Lmax}/kW$	25
DAB 单元高压侧电容 $C_{DCH}/\mu F$	2200
DAB 单元低压侧电容 $C_l/\mu F$	40
整流馈电模块交流侧串联电感 $L_s/mH$	5
变压器 $T_i$ 高压侧串联电感 $L_{T_i}/mH$	0.5
变压器变比 $n_{Ti}=N_1/N_2$	1:1
HFI-PCS 级联数 $n$	2
开关频率 $f/kHz$	20

### 4.2 仿真波形分析

图 7 为稳态下各级联 DAB 单元高压直流侧电压及高频链电流波形。由图可知, 两组 DAB 单元高压直流侧电压及高频链电流均相等, 较好地实现了 HFI-PCS 的电压、功率平衡控制。

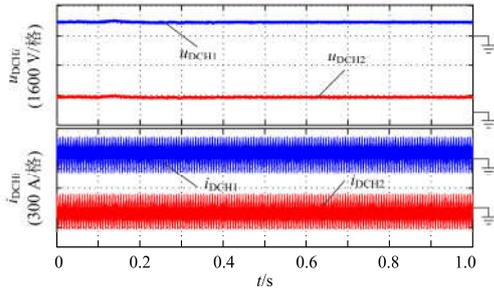


图 7 稳态时的 DAB 单元高压直流侧电压、电流波形

Fig. 7 Steady state voltage and current waveforms at HVDC side of DAB high frequency conversion unit

图 8 为由模式 2 向模式 1 切换时的电压电流波形。如图 8(a)所示, 在模式 2 下, 主网出口电压、电流反相位, 主网从直流系统吸收电能; 当  $t=0.42$  s 时, 模型切换至模式 1, 主网出口电流变换为与电压同相位, 同时幅值增大, 主网向直流系统输出电能, 即整流馈电模块能够实现单位功率因数<sup>[24]</sup>的能量双向传输。在模式 2 下, 主网出口电流不控, 此时  $i_{DC}$  波动较大; 切换至模式 1 后, 对  $i_{DC}$  采取控制, 其波形变化如图 8(b)所示。由图 8(c)可知, 在模式切换过程中, 负载电压基本恒定, 始终稳定在 380 V 左右, 保证了对负载的连续可靠供电。

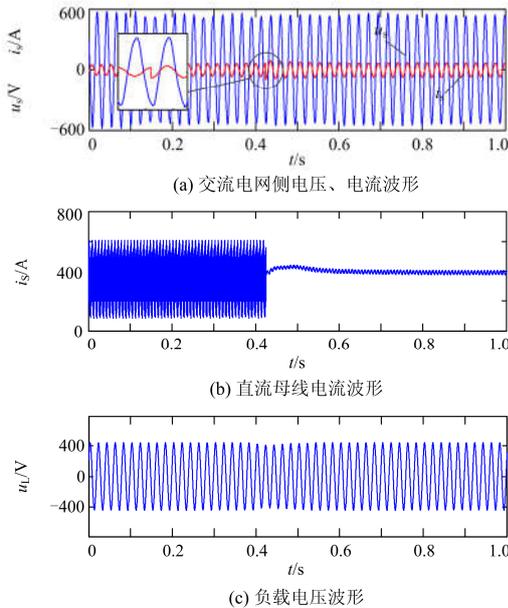


图 8 模式 2 向模式 1 切换的电压、电流波形

Fig. 8 Voltage and current waveforms of Mode 2 to Mode 1

图 9 为由模式 2 向模式 1 切换时的电压、功率波形。由图可知, 当  $t=0.4$  s 时, 光伏系统出力由 21 kW 陡然降低至 8 kW, 导致直流母线电压开始下降, 此时, ESS 加速释放功率, 直到  $t=0.42$  s 达到最大输出值 15 kW 时, 本地负载需求仍有 3 kW 缺额, 系统由模式 2 切换至模式 1, 主网增大输出, 转由 DAB 高频变换模块控制直流母线电压回到设计值 800 V 左右。模式 1 向模式 2 的切换是以上所述的逆过程, 不再赘述。

图 10 为由模式 2 向模式 3 切换时的电压、功率波形。由图可知, 当  $t=0.4$  s 时, 光伏系统出力由 9 kW

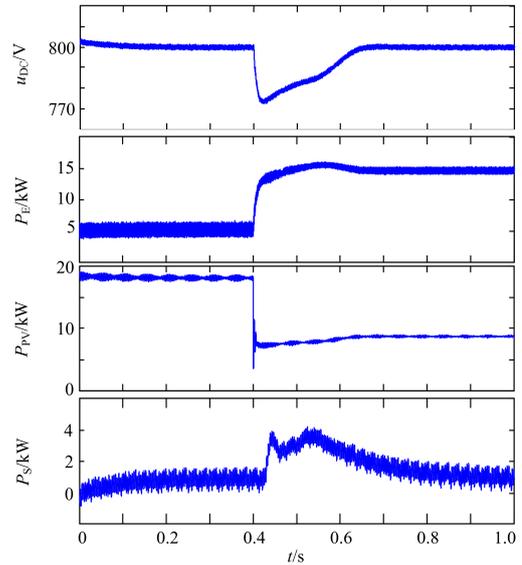


图 9 模式 2 向模式 1 切换的电压、功率波形

Fig. 9 Voltage and power waveforms from Mode 2 to Mode 1

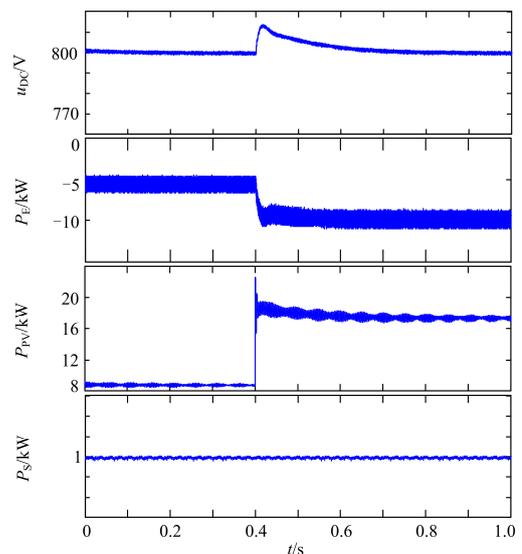


图 10 模式 2 向模式 3 切换的电压、功率波形

Fig. 10 Voltage and power waveforms from Mode 2 to Mode 3

徒然升高至 17 kW, 导致直流母线电压开始上升, ESS 开始以最大功率 12 kW 吸收电能, 但仍有功率剩余, 系统由模式 2 切换至模式 3, 光伏系统脱离 MPPT 状态, 限制出力, 转而控制直流母线电压。模式切换过程中, 公共交流电网按照上层调度指令运行, 出力恒定在 1 kW。模式 3 向模式 2 的切换是以上所述的逆过程, 不再赘述。

## 5 结论

随着智能配电概念的提出和分布式发电技术的快速发展, 高频、高效、绿色、经济的新型配电方式已逐渐受到世界各国的高度重视。本文以 HFI-PCS 为基础, 搭建了直流配电系统实验模型, 针对所设计的 3 种运行模式, 提出了适用于高频连接方式的直流配网分层逻辑控制策略, 并通过理论分析和基于 Matlab/Simulink 的仿真实验, 得出如下结论。

1) 实验模型中的 HFI-PCS 结构单元采用模块化设计, 便于工程应用, 为将来系统的升级扩容提供了重要参考。

2) HFI-PCS 实现了功率的双向传输, 保证了对电能的最优利用。同时, 由于 DAB 高频变换模块具有电气隔离功能, 能够有效保证直流系统在孤网模式下的运行稳定性。

3) 本文设计的直流配网分层逻辑控制策略能够实现系统不同工作模式间的平滑切换, 过程中负载电压和直流母线电压仅存在极短时的小幅波动, 保证了对负载侧的供电连续性和可靠性。

4) 本文所提出的控制方法采取就地控制方式, 无需互联互通, 大大简化了控制系统结构, 并使整个配电网具备了“即插即用”功能。

## 参考文献

- [1] 吴素农, 范瑞祥, 朱永强, 等. 分布式电源控制与运行[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [2] 田崇翼, 李珂, 张承慧, 等. 基于切换模型的双向 AC-DC 变换器控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 70-76.  
TIAN Chongyi, LI Ke, ZHANG Chenghui, et al. Control strategy for bi-direction AC-DC converter based on switched system model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 70-76.
- [3] MARNAY C, ROBIO F J, SIDDIQUI A S. Shape of the micro-grid[C] // IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Columbus, OH, USA, 2001, 1: 150-153.
- [4] ELSAYED A T, MOHAMED A A, MOHAMMED O A. DC microgrids and distribution systems: an overview[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 407-417.
- [5] 于亚男, 金阳忻, 江全元, 等. 基于 RT-LAB 的柔性直流配电网建模与仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 125-130.  
YU Yanan, JIN Yangxin, JIANG Quanyuan, et al. RT-LAB based modeling and simulation analysis of flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 125-130.
- [6] 孙刚, 时伯年, 赵宇明, 等. 基于 MMC 的柔性直流配电网故障定位及保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(22): 127-133.  
SUN Gang, SHI Bonian, ZHAO Yuming, et al. Research on the fault location method and protection configuration strategy of MMC based DC distribution grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(22): 127-133.
- [7] 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.
- [8] BOROYEVICH D, CVETKOVIĆ I, DONG D, et al. Future electronic power distribution systems a contemplative view[C] // Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2010 12th International Conference on: IEEE, 2010: 1369-1380.
- [9] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106.  
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106.
- [10] ZHAO B, SONG Q, LIU W, et al. Characterization and application of next-generation SiC power devices for high-frequency isolated bidirectional DC-DC converter[C] // IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society: IEEE, 2012: 281-286.
- [11] 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 transformers for flexible DC distribution[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(25): 4295-4303.
- [12] 张树东, 朱大为, 刘闯, 等. 交直流混合配电型通用功率变换器(UPC)研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 48-55.  
ZHANG Shudong, ZHU Dawei, LIU Chuang, et al. Universal power converter (UPC) for hybrid AC and DC

- distribution[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(1): 48-55.
- [13] 鲁国正, 高亮, 梁智敏. 电压源换流器接地方式对直流配电系统的影响[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 43(19): 125-130.  
LU Guozheng, GAO Liang, LIANG Zhimin. Influence of voltage source converter grounding mode on DC distribution system[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 43(19): 125-130.
- [14] 孟润泉, 刘家赢, 文波, 等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. *高电压技术*, 2015, 41(7): 2186-2193.  
MENG Runquan, LIU Jiaying, WEN Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. *High Voltage Engineering*, 2015, 41(7): 2186-2193.
- [15] SALOMONSSON D, SANNINO A. Low-voltage DC distribution system for commercial power systems with sensitive electronic loads[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2007, 22(3): 1620-1627.
- [16] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能电网中的新一代高频隔离功率转换技术[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(36): 6369-6379.  
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. Next-generation high-frequency-isolation power conversion technology for smart grid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(36): 6369-6379.
- [17] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制[J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(4): 16-24.  
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(4): 16-24.
- [18] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(9): 156-163.  
LI Wuhua, GU Yunjie, WANG Yuxiang, et al. Reactive voltage coordinated control for distribution network with DSTATCOMs and DGs[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(9): 156-163.
- [19] PRABHALA V A K, BADDIPADIGA B P, FERDOWSI M. DC distribution systems—an overview[C] // *Renewable Energy Research and Application (ICRERA)*, 2014 International Conference on: IEEE, 2014: 307-312.
- [20] 欧阳丽, 周丽红, 向海斌, 等. 无需互联通信的直流微电网实时功率协调控制策略[J]. *电网技术*, 2015, 39(12): 3449-3456.  
OUYANG Li, ZHOU Lihong, XIANG Haibin, et al. Real-time power coordinated control strategy for DC microgrid without communication[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(12): 3449-3456.
- [21] 陆晓楠, 孙凯, JOSEP G, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(4): 35-42.  
LU Xiaonan, SUN Kai, JOSEP G, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(4): 35-42.
- [22] 宋鑫, 肖建国, 牛洁茹, 等. 一种用于新能源混合发电的移相控制三端口 DC-DC 变流器[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(17): 36-44.  
SONG Xin, XIAO Jianguo, NIU Jieru, et al. A three-port DC-DC converter with phase shift control for the hybrid renewable energy generation system[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(17): 36-44.
- [23] ITO Y, ZHONGQING Y, AKAGI H. DC microgrid based distribution power generation system[C] // *Power Electronics and Motion Control Conference*, 2004. IPEMC 2004. The 4th International: IEEE, 2004, 3: 1740-1745.
- [24] VÁZQUEZ N, AGUILAR C, ARAU J, et al. A novel uninterruptible power supply system with active power factor correction[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2002, 17(3): 405-412.

收稿日期: 2016-06-26; 修回日期: 2016-08-08

作者简介:

王振浩(1964—), 男, 教授, 主要从事输变电设备状态监测与控制方面的科研教学工作; E-mail: zhenhaowang@126.com

成 龙(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事交直流混合配电系统结构与运行控制分析方面的研究工作; E-mail: chenglong\_1231@126.com

孙福军(1963—), 男, 高级工程师, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作。E-mail: 308362285@qq.com

(编辑 周金梅)