

# 基于SRDAB DC-DC变换器的 直流变压器控制

沈杰鑫,刘磊,何丹东,刘振国,储后广,马捍超

(国网新疆电力有限公司 电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:**采用当前方法对DC-DC变换器的直流变压器进行控制时,控制效率低、抗扰性差、损耗检测误差大。为解决存在的问题,提出一种基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法。通过分析基于串联谐振型双主动全桥(SRDAB)的DC-DC变换器在运行过程中产生的半导体器件暂态损耗、半导体器件通态损耗、变压器一般损耗等各类损耗,以此计算变换器在工作过程中的总损耗。将损耗最小作为目标,建立变换器的直流变压器控制模型,并设置相关约束条件,采用遗传算法对直流变压器控制模型进行求解,完成直流变压器的控制。实验结果表明,所提方法效率高、抗扰性好、损耗检测误差小,实际应用效果好。

**关键词:**串联谐振型双主动全桥;直流变压器;损耗分析;控制模型;遗传算法

**中图分类号:**TM464 **文献标识码:**A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqcd23599

## DC Transformer Control Based on SRDAB DC-DC Converter

SHEN Jiexin, LIU Lei, HE Dandong, LIU Zhenguo, CHU Houguang, MA Hanchao

(Electric Power Research Institute, State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd.,

Urumqi 830000, Xinjiang, China)

**Abstract:** When the current method is used to control the DC transformer of the DC-DC converter, the control efficiency is low, the immunity is poor, and the loss detection error is large. In order to solve the existing problems, a DC transformer control method based on the SRDAB DC-DC converter was proposed. By analyzing the transient losses of semiconductor devices, the on-state losses of semiconductor devices, the general losses of transformers and other losses generated during the operation of the DC-DC converter based on the series resonant dual active bridge (SRDAB), the total loss in the working process of the converter was calculated. Taking the minimum loss as the goal, the DC transformer control model of the converter was established, and the relevant constraints were set, and the genetic algorithm was used to solve the DC transformer control model to complete the control of the DC transformer. The experimental result shows that the proposed method has high efficiency, good immunity, small loss detection error and good practical application effect.

**Key words:** series resonant dual active bridge (SRDAB); direct current (DC) transformer; loss analysis; control model; genetic algorithm

在能源危机不断加剧和环境污染问题日益严重的背景下,相关领域的专家和学者加大了对清洁能源技术的研究力度<sup>[1]</sup>。目前可再生能源在使用过程中出现了分散性、不确定性、间接性和规模大等问题,因此将可再生能源接入交流电力系统时需要保障系统运行的稳定性。配电网在发展过程中面临的主要问题是新型节能电源的接入问题<sup>[2]</sup>,而在电能路由器中串联谐振

型双主动全桥(series resonant dual active bridge, SRDAB)的DC-DC变换器属于其重要组成部分,这一设备是一种较新颖的直流配电网功率变换设备,因其具有零电流开关、控制简单等多种优势,相关领域认为该设备可以作为中低压直流配电网隔离变换器的首选拓扑。该设备的工作原理是通过H桥电路发出开环定频的方波使系统处于谐振状态,从而获得较高的系统效率和

**基金项目:**国家重点研发计划资助项目(2016YFB0901100);国家电网公司科技项目(52130417002U)

**作者简介:**沈杰鑫(1994—),男,本科,工程师,Email:sjxed33@163.com

**通讯作者:**马捍超(1987—),男,硕士,高级工程师,Email:zd812012@163.com

快速的动态响应,以此实现电气隔离、配电网间功率平衡等多种功能。为了提高DC-DC变换器的工作性能,需要利用其对直流变压器进行优化控制。

文献[3]提出基于直流链匹配的直流变压器控制方法,该方法分析了变换器直流电流纹波机理,根据分析结果利用拉格朗日因子法获得直流链占空比条件,在直流链匹配的基础上实现直流变压器的优化控制,但是该方法没有对变换器中的直流变压器整体损耗进行分析,导致该方法存在损耗检测误差大和效率低的问题。文献[4]提出基于波动功率传递的直流变压器控制方法,该方法为了实现电容容值的优化将电流低频成分传输到直流变压器的低压侧,并对直流变压器受波动功率传递的影响进行量化分析,采用电容优化方法根据分析结果对直流变压器进行优化控制,但是该方法没有对变换器中的直流变压器损耗进行分析,导致方法的抗扰性较差。

为了解决上述方法中存在的问题,现提出一种基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法,以考虑电路内部等效电阻以及谐振电流和高频隔离变压器两端方波电压的所有谐波分量为前提,建立了SRDAB的时域数学模型。基于串联谐振型双主动全桥的DC-DC变换器中的开关器件、谐振电感、谐振电容、输出电容等硬件设备,分析SRDAB DC-DC变换器的半导体器件暂态损耗、半导体器件通态损耗、变压器一般损耗等情况,并将损耗最小作为目标,建立变换器的直流变压器控制模型,采用遗传算法对直流变压器控制模型进行求解,实现直流变压器的控制。该方法的效率高、抗扰性好、损耗检测误差小,表现出了更佳的应用效果。

## 1 损耗计算

### 1.1 半导体器件暂态损耗

在SRDAB DC-DC变换器运行过程中所产生的损耗包括三类,分别是暂态损耗、通态损耗和组态损耗,其中组态损耗的值通常较小,在分析过程中可以忽略<sup>[5]</sup>。变换器在运行过程中损耗最大的类别是暂态损耗,而单次开关动作所产生的损耗一般情况下受实际应用工况和半导体器件特性的影响。

开关动作产生的损耗通常与暂态损耗之间

成正比关系,工作状态下的变压器产生的电流和电压分别用 $I_{\text{exp}}, V_{\text{exp}}$ 进行描述,设 $E_{\text{on\_typ}}, E_{\text{off\_typ}}$ 分别表示单次开关开通和关断所对应的暂态损耗,可通过下式计算得到:

$$\begin{cases} E_{\text{on\_typ}} = \frac{6.5 \times 10^{-3}}{50 \times 600} V_{\text{exp}} I_{\text{exp}} \\ E_{\text{off\_typ}} = \frac{4.0 \times 10^{-3}}{50 \times 600} V_{\text{exp}} I_{\text{exp}} \end{cases} \quad (1)$$

设 $C_{\text{on}}, C_{\text{off}}$ 分别表示开通损耗参数与关断损耗参数,其计算公式为

$$\begin{cases} C_{\text{on}} = \frac{E_{\text{on\_typ}}}{V_{\text{CE\_ds}} i_{\text{C\_ds}}} \\ C_{\text{off}} = \frac{E_{\text{off\_typ}}}{V_{\text{CE\_ds}} i_{\text{C\_ds}}} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $i_{\text{C\_ds}}$ 为电流在特定工况下的值; $V_{\text{CE\_ds}}$ 为电压在特定工况下的值。

根据式(1)、式(2)计算结果,获得半导体器件在SRDAB DC-DC变换器工作状态下的暂态损耗为

$$\begin{cases} E_{\text{on,exp}} = C_{\text{on}} V_{\text{exp}} I_{\text{exp}} \\ E_{\text{off,exp}} = C_{\text{off}} V_{\text{exp}} I_{\text{exp}} \end{cases} \quad (3)$$

用功率的形式描述式(3)计算得到的暂态损耗如下:

$$P_{\text{tran}} = \frac{\sum_i E_{\text{on,exp}} N_{\text{on},i} + \sum_i E_{\text{off,exp}} N_{\text{off},i}}{T_s} \quad (4)$$

式中: $N_{\text{on},i}$ 为器件在运行期间的开通次数; $N_{\text{off},i}$ 为器件在运行期间的关断次数; $T_s$ 为运行时间。

分别用 $i_{\text{pri}}$ 和 $i_{\text{sec}}$ 表示DC-DC变换器在过谐振 $U_1$ 以及欠谐振 $U_2$ 状态下产生一次侧器件和二次侧器件的开关动作电流<sup>[6-7]</sup>,因此半导体器件在SRDAB DC-DC变换器运行状态下的暂态损耗可通过下式计算得到:

$$P_{\text{tran}} = \frac{2(C_{\text{off,pri}} U_1 i_{\text{pri}} + C_{\text{off,sec}} U_2 i_{\text{sec}})}{T_{\text{hs}}} \quad (5)$$

式中: $T_{\text{hs}}$ 为从 $U_1$ 状态到 $U_2$ 状态的时间。

### 1.2 半导体器件通态损耗

设 $I_c$ 为器件对应的通态电流, $V_{\text{on}}$ 为器件对应的通态电压,两者之间存在线性关系,因此可以分别用 $V_{\text{on,act}}, V_{\text{on,dio}}$ 描述主动开关管和二极管在工作状态下产生的通态压降,其计算公式如下:

$$\begin{cases} V_{\text{on,act}} = A_{\text{act}} I_c + B_{\text{act}} \\ V_{\text{on,dio}} = A_{\text{dio}} I_c + B_{\text{dio}} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_{\text{act}}, B_{\text{act}}, A_{\text{dio}}, B_{\text{dio}}$ 为不同的常数系数。

电流波形和器件的特性都会对通态损耗产

生影响,由于电流在不同时段内会流经主动开关器件或二极管,则一次侧电流和二次侧电流在相同时刻流通的路径也存在差异<sup>[8-9]</sup>。

用 $P_{\text{steady}}$ 描述变换器在工作状态下产生的通态损耗功率,该值可以通过该工况下的电压和电流值计算得到,则可获得SRDAB DC-DC变换器的半导体器总损耗 $P_{\text{dev}}$ 为

$$P_{\text{dev}} = P_{\text{steady}} + P_{\text{tran}} \quad (7)$$

### 1.3 变压器一般损耗

电流在励磁支路中通常较小,产生的损耗可以忽略不计<sup>[10]</sup>,但需要对铜耗进行计算。铜耗指的是电流流过变压器绕组时,由于绕组电阻发热而导致的损耗,因为绕组大多数是铜材料制成的,故称铜耗或铜损,属于是一种有功损耗。铜耗 $P_{\text{Cu}}$ 的计算公式如下:

$$P_{\text{Cu}} = I_{\text{rms}}^2 R_{\text{tr}} = I_{\text{rms}}^2 (R_s + R_{\text{r1}} + R'_{\text{r2}}) \quad (8)$$

式中: $I_{\text{rms}}$ 为电流流经变压器的有效值; $R_{\text{r}}, R_{\text{r1}}, R'_{\text{r2}}$ 均为电路电阻; $R_s$ 为独立电感对应的等效电阻。

设 $P_{\text{core}}$ 为变压器在工作状态下产生的铁心损耗,可通过Steinmetz公式计算:

$$P_{\text{core}} = C_{\text{Fe}} f^\alpha B_m^\beta V_e \quad (9)$$

式中: $C_{\text{Fe}}$ 为铁心对应的损耗系数; $f$ 为开关频率; $B_m$ 为可以利用法拉第定律计算得到的峰值磁通密度<sup>[11-12]</sup>;上标 $\alpha, \beta$ 为不同的铁心损耗量; $V_e$ 为铁心体积。

设 $H$ 为铁心在变压器工作状态下产生的磁场强度,可通过下式计算得到:

$$H = \frac{2N_1 I_1}{4D + A} = \frac{2N_2 I_2}{4D + A} \quad (10)$$

式中: $I_1, I_2$ 分别为变压器原、副边电流; $N_1, N_2$ 分别为变压器原、副边匝数; $D$ 为移相比; $A$ 为常数。

材料对应的磁场强度与其产生的磁导率可以用非线性方程进行描述,而电流 $I_{\text{1m}}$ 是计算峰值磁通密度 $B_m$ 的主要参数,存在以下关系式:

$$\begin{cases} I_{\text{1m}} = \max(i_{\text{pri}}, i_{\text{sec}}) \\ B_m = \mu_0 \mu_r H_{\text{1m}} = \mu_0 \mu_r \frac{2N_1 I_{\text{1m}}}{4D + A} \end{cases} \quad (11)$$

根据铜耗 $P_{\text{Cu}}$ 与铁心损耗 $P_{\text{core}}$ ,对二者之和进行计算,结果为

$$P_{\text{Cu}} + P_{\text{core}} = P_{\text{tr}} \quad (12)$$

结合半导体器总体损耗、变压器一般损耗计算结果,获得直流变压器的总损耗:

$$P_{\text{loss}} = P_{\text{dev}} + P_{\text{tr}} \quad (13)$$

## 2 直流变压器控制

### 2.1 目标函数

将总损耗最小作为变压器控制优化的目标,建立直流变压器控制模型:

$$\min(\sum_{j=1}^M P_{\text{loss}}) = \sum_{j=1}^M w_j (P_{\text{dev}} + P_{\text{tr}}) \quad (14)$$

式中: $M$ 为在SRDAB DC-DC变换器中的直流变压器总数量; $w_j$ 为子目标函数在优化模型中对应的权重。

### 2.2 约束条件

#### 2.2.1 中性点直流电流

设 $I_{\text{max}}$ 为直流变压器允许的直流限值,则感应电流的约束条件为

$$\max[|I_j| - I_{\text{max}}(j)] \leq 0 \quad (15)$$

式中: $I_j$ 为经过直流变压器的实际感应电流。

#### 2.2.2 中性点电阻值

设 $R_j$ 为中性点接地电阻值,在《交流电气装置的接地》基础上设置对应的约束<sup>[13]</sup>,即

$$R_j < 2000/I_{\text{sc}} \text{ 或 } R_j < R_{\text{max}} \quad (16)$$

式中: $R_{\text{max}}$ 为接地电阻限值; $I_{\text{sc}}$ 为短路电流。

在实际的工程应用中,接地电阻以及土壤电阻率等因素都会对接地电阻限值 $R_{\text{max}}$ 产生一定程度的影响。

#### 2.2.3 系统稳定约束

系统稳定约束的公式如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, \mu) \\ g(x, \mu) = 0 \end{cases} \quad x \in \mathbb{R}^n \quad (17)$$

式中: $x$ 为状态变量; $f(\cdot)$ 为动态特性函数; $\mu$ 为系统参数; $g(\cdot)$ 为功率平衡方程。

### 2.3 模型求解

本文主要选择遗传算法进行直流变压器控制模型求解,具体过程如下:

1)选择控制参数。设 $P_c$ 为设定的交叉概率, $P_m$ 为种群对应的变异概率。控制交叉算子是在遗传算法中的主要任务,当个体在运算过程中的 $P_c$ 较大时,个体会产生过度交叉现象,导致优良品种在过度交叉操作下被破坏;当个体在运算过程中的 $P_c$ 较小时,搜索时间变长,速度下降。当 $P_m$ 较小时,难以在短时间内生成新的个体;当 $P_m$ 较大时,容易出现种群过剩的现象<sup>[14]</sup>。所以结合以上的分析,本文令 $P_m = 0.075$ , $P_c = 0.75$ 。

2)算法终止条件。完成适应度函数的设计

是优化问题的主要部分<sup>[15]</sup>,所提方法选用 ranking 函数作为遗传算法的适应度函数。

3) 算法求解流程。所提方法采用遗传算法求解直流变压器控制模型的流程如图1所示。

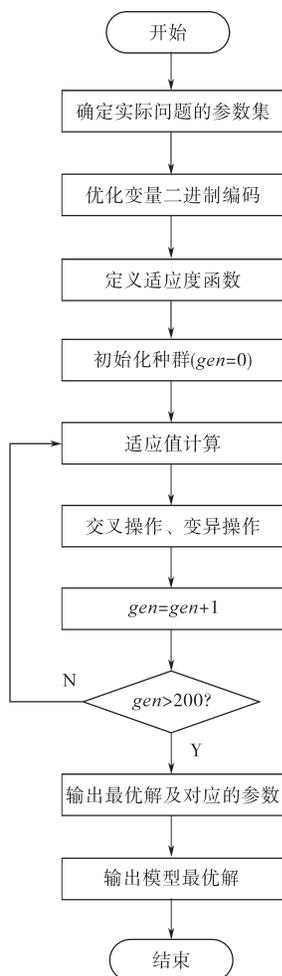


图1 模型求解流程

Fig.1 Model solution process

### 3 实验与分析

为了验证所提基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法的整体有效性,需要对其进行相关测试。设 $\eta$ 为变换器对应的效率,其计算公式如下:

$$\eta = \frac{P_o - P_{\text{loss}}}{P_o} \quad (18)$$

式中: $P_{\text{loss}}$ 为变换器在工作状态下产生的损耗; $P_o$ 为变换器在工作状态下的输出功率。

分别对基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法(方法1)、基于直流链匹配的直流变压器控制方法(方法2)和基于波动功率传递的直流变压器控制方法(方法3)进行测试,测试结果如图2所示。

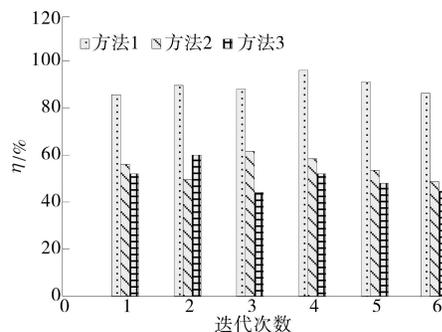


图2 不同方法的效率测试结果

Fig.2 Efficiency test results of different methods

分析式(18)可知:变压器损耗越小,效率越高。根据图2可知,在多次迭代中方法1的效率远高于方法2和方法3,这是因为基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法在对直流变压器进行控制之前,对DC-DC变换器的损耗进行了分析和优化,并以损耗最小为目标函数构建了直流变压器的优化控制模型,进而提高了效率。

采用方法1、方法2和方法3进行扰动测试,测试结果如图3所示。

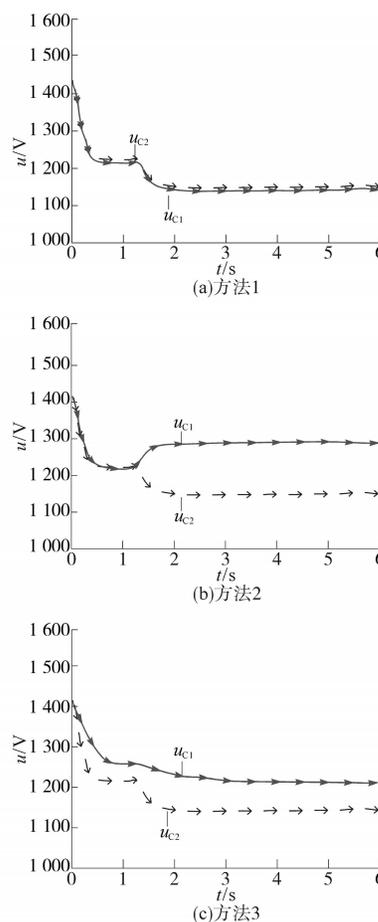


图3 不同方法的扰动测试结果

Fig.3 Disturbance test results of different methods

根据图3可知,采用方法1对变换器的电容

电压进行抗扰控制时,电容电压可以在短时间内实现平衡;采用方法2和方法3对变换器的电容电压进行抗扰控制时,电容电压无法保持平衡。对比上述测试结果可知,方法1的抗扰性好,这是因为基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法对直流变压器进行控制之前,优化了变换器的损耗,降低了因损耗过大引起的扰动现象,进而提高了抗扰性。

分别采用方法1、方法2和方法3对变换器的损耗进行测试,并将测试结果与实际损耗进行对比,结果如图4所示。

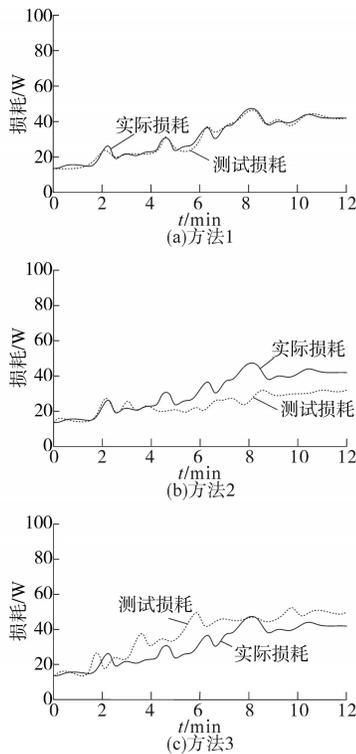


图4 不同方法的损耗测试结果

Fig.4 Loss test results of different methods

通过图4可知,采用方法2和方法3对变换器的损耗进行检测时,获得的检测结果与实际损耗之间的差距比较大,无法准确对损耗进行检测;而采用方法1对变换器的损耗进行检测时,获得的检测结果与实际损耗基本相符,这是因为基于SRDAB DC-DC变换器的直流变压器控制方法对损耗进行计算时,计算了SRDAB DC-DC变换器中多种类型的损耗,使得到的损耗结果更贴近实际结果。

## 4 结论

随着电力技术的飞速发展,直流输配电接入新能源发电系统的成本低、线路造价低、供电可

靠性高等优点逐渐凸显出来,越来越多的学者开始研究直流变压器的控制方法。目前直流变压器控制方法存在效率低、损耗检测误差大、抗扰性差的问题,为此提出对SRDAB DC-DC变换器的损耗进行计算和优化,并以此为基础构建直流变压器控制模型,实现直流变压器的控制。实验结果表明,所提方法的效率高、抗扰性好、损耗检测误差小,实际应用效果好,可以很好地解决目前方法中存在的问题。

### 参考文献

- [1] 马保慧,程盛,史书怀,等.基于混合子模块MMC结构的直流变压器控制策略[J].电气传动,2019,49(10):75-79.  
Ma Baohui, Cheng Sheng, Shi Shuhuai, et al. DC transformer control strategy based on hybrid sub-module MMC structure[J]. Electric Drive, 2019, 49(10): 75-79.
- [2] 王瑞田,肖飞,范学鑫,等.三电平移相全桥直流变换器的变压器直流偏置分析与抑制[J].电工技术学报,2019,34(16):47-56.  
Wang Ruitian, Xiao Fei, Fan Xuexin, et al. Analysis and suppression of transformer DC bias of three-level phase-shifted full-bridge DC converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 47-56.
- [3] 陈东,梅念,孙谦浩,等.用于HVDC系统互联的高频模块化直流变压器优化控制策略[J].电力自动化设备,2019,39(1):33-38.  
Chen Dong, Mei Nian, Sun Qianhao, et al. Optimal control strategy of high-frequency modular DC transformer for HVDC system interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 33-38.
- [4] 周剑桥,王晗,张建文,等.基于波动功率传递的MMC型固态变压器子模块电容优化方法[J].中国电机工程学报,2020,40(12):297-311.  
Zhou Jianqiao, Wang Han, Zhang Jianwen, et al. MMC solid-state transformer sub-module capacitance optimization method based on fluctuating power transfer[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 297-311.
- [5] 朱小贤,淡淑恒,傅晓飞.直流剩磁对大容量变压器空载合闸特性的影响[J].高压电器,2020,56(4):113-117.  
Zhu Xiaoxian, Dan Shuheng, Fu Xiaofei. The influence of DC residual magnetism on the no-load closing characteristics of large-capacity transformers[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(4): 113-117.
- [6] 李胜,李春叶.高频模块化直流变压器通用损耗计算方法[J].电力电子技术,2019,53(2):60-63.  
Li Sheng, Li Chunye. General loss calculation method of high-frequency modular DC transformer[J]. Power Electronics Technology, 2019, 53(2): 60-63.
- [7] 吴小康, Schmid Robert, 张帆,等. NOUS控制和PID控制的直流降压变压器控制性能对比[J].河海大学学报(自然科学

- 版), 2020, 48(5): 93-98.  
Wu Xiaokang, Schmid Robert, Zhang Fan, *et al.* Control performance comparison between NOUS control and PID control DC step-down transformer[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(5): 93-98.
- [8] 卢林煜, 王鲁杨, 柏扬, 等. 面向能源互联网的固态变压器中双向有源桥直流变换器研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 141-150.  
Lu Linyu, Wang Luyang, Bai Yang, *et al.* Research on dual active bridge DC converters in solid-state transformers for energy internet[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6): 141-150.
- [9] 潘超, 石文鑫, 金明权, 等. Y/?接线电力变压器直流扰动励磁特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(4): 151-158.  
Pan Chao, Shi Wenxin, Jin Mingquan, *et al.* DC disturbance excitation characteristics of Y/? connection power transformers[J]. High Voltage Technology, 2019, 45(4): 151-158.
- [10] 潘超, 米俭, 蔡国伟, 等. 交直流混杂环境下变压器漏电感参数分析方法[J]. 电机与控制学报, 2019, 23(5): 25-33.  
Pan Chao, Mi Jian, Cai Guowei, *et al.* Analysis method of transformer leakage inductance parameters in AC/DC hybrid environment[J]. Journal of Electrical Machines and Control, 2019, 23(5): 25-33.
- [11] 武岩松, 谢宝昌, 蔡旭. 基于磁集成变压器的光伏电站直流并网[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(3): 106-111.  
Wu Yansong, Xie Baochang, Cai Xu. DC grid-connected photovoltaic power station based on magnetic integrated transformer[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(3): 106-111.
- [12] 杜永, 张亚光, 李丽宏. 双向有源直流变换器回流功率优化控制研究[J]. 现代电子技术, 2020, 43(11): 172-175.  
Du Yong, Zhang Yaguang, Li Lihong. Research on optimal control of backflow power of bidirectional active DC converter[J]. Modern Electronic Technology, 2020, 43(11): 172-175.
- [13] 刘春喜, 乔宇, 郑文帅, 等. 基于 GaN 器件的电池化成用双向直流变换器研究[J]. 电力电子技术, 2020, 54(10): 67-70.  
Liu Chunxi, Qiao Yu, Zheng Wenshuai, *et al.* Research on bidirectional DC converters for battery formation based on GaN devices[J]. Power Electronics Technology, 2020, 54(10): 67-70.
- [14] 王露钢, 姜来, 张辉, 等. 智能变电站合并单元二次信号无线相位测试装置的研制[J]. 计算技术与自动化, 2020, 39(4): 45-50.  
Wang Lugang, Jiang Lai, Zhang Hui, *et al.* Development of a wireless phase test device for the secondary signal of the merging unit of a smart substation[J]. Computer Technology and Automation, 2020, 39(4): 45-50.
- [15] 张焕青, 张慕婕, 王裕, 等. 基于多目标性能优化的模块化多电平高频直流变压器移相控制策略[J]. 高压电器, 2019, 55(9): 24-31, 39.  
Zhang Huanqing, Zhang Mujie, Wang Yu, *et al.* Modular multi-level high frequency DC transformer phase shift control strategy based on multi-objective performance optimization[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(9): 24-31, 39.

收稿日期: 2021-06-01

修改稿日期: 2021-07-08