

基于有源逆变的新型混合式低压侧宽幅调压方法研究

刘庆龙¹, 傅裕斌², 薄海旺³, 王永华², 刘轩东^{1*}

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国网江西省电力有限公司 南昌供电分公司, 江西 南昌 330000;

3. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077)

Research on a Novel Hybrid Wide-Range Voltage Regulation Method on Low-Voltage Side Based on Active Inversion

LIU Qinglong¹, FU Yubin², BO Haiwang³, WANG Yonghua², LIU Xuandong^{1*}

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. State Grid Nanchang Power Supply Company, State Grid Jiangxi Electric Power Supply Co., Ltd., Nanchang 330000, China;

3. State Grid Jiangxi Electric Power Supply Co., Ltd., Nanchang 330077, China)

Abstract: [Objective] The integration of high-penetration photovoltaics and high-power electric vehicles has altered the operating characteristics of power systems, resulting in frequent wide-range voltage fluctuations. This imposes stricter requirements on the voltage regulation speed, range, and capacity of distribution transformers. Traditional distribution transformers, limited by the high-voltage side, exhibit small tap steps and slow voltage regulation speeds, making wide-range voltage regulation impossible. To address this issue, this study proposes a novel hybrid wide-range voltage regulation method on low-voltage side based on active inversion, which connects the tap changer to the low-voltage side of the distribution transformer to achieve wide-range voltage regulation. [Methods] To address the challenges of high switching currents and large conduction losses on the low-voltage side, an inverter power source was incorporated into the power electronic commutation branch. A voltage-current dual-loop competition strategy was employed to regulate the control signals of the inverter circuit, offsetting the forward voltage of electronic components and enabling zero voltage across the mechanical branch. Meanwhile, the inverter circuit was activated to generate load current, forcing current commutation from the mechanical branch to the power electronic commutation branch, thus achieving zero current in the mechanical branch. This ensured true zero-voltage and zero-current operation of the mechanical switch, solving the

problem of incomplete arc extinction in traditional hybrid switches. [Results] The simulation results showed that the inverter power supply provided zero-voltage and zero-current conditions for the mechanical switch, enabling arc-free operation. Compared to traditional hybrid switches, the proposed novel hybrid wide-range voltage regulation method on the low-voltage side reduced the voltage regulation time by at least four times. Moreover, it generated significantly lower arc energy during switching. After 300 000 switching operations, the mechanical contacts had a remaining service life index of 97.2%, demonstrating relatively long service life, while traditional hybrid switches exhibited a service life index of only 37.9%. [Conclusion] The proposed novel hybrid wide-range voltage regulation method on the low-voltage side achieves rapid, wide-range, and low-loss voltage regulation.

Key words: distribution transformer; wide-range voltage regulation on low-voltage side; inverter circuit; zero-voltage operation; zero-current operation

摘 要: [目的] 高渗透率光伏和高功率电动汽车接入改变了电力系统原有的运行特征,使电压宽幅跳变成常态,对配电变压器的调压速度、调压范围以及容量提出了更高的要求。传统配电变压器受限于高压侧高电压,分接头级差小、调压速度慢,不能实现宽幅调压。针对此问题,本文提出了一种基于有源逆变的新型混合式低压侧

宽幅调压方法,将分接开关接在配电变压器低压侧,以实现宽幅调压。【方法】针对低压侧切换电流高、通态损耗大的问题,采用逆变电源串入电力电子换流支路,基于电压电流双环竞争策略对逆变电路的控制信号进行调控,抵消电子器件正向电压,实现机械支路零电压;同时驱动逆变电路产生负载电流,强制电流由机械支路换流到电力电子换流支路,实现机械支路零电流。机械开关真正零电压、零电流动作,解决了传统混合式开关消弧不彻底的问题。【结果】仿真结果表明,逆变电源能够为机械开关提供零电压、零电流动作条件,机械开关无弧动作。与传统混合式开关相比,本文所提新型混合式低压侧宽幅调压方法的调压时间至少缩短了 4 倍;并且切换过程中产生的电弧能量较小,进行 30 万次开关动作后,机械触头的剩余使用寿命指数为 97.2%,仍具有较高的使用寿命,而传统混合式开关的寿命指数仅为 37.9%。【结论】本文所提新型混合式低压侧宽幅调压方法能够实现快速宽幅低损调压。

关键词: 配电变压器; 低压侧宽幅调压; 逆变电路; 零电压动作; 零电流动作

0 引言

高渗透率光伏发电和电动汽车大规模接入是未来电力系统的重要特征^[1-2],光伏出力大幅波动、电动汽车大功率冲击性接入引发的电压宽幅跳变将成为常态,对配电变压器的调压速度、调压范围以及容量提出更高的要求^[3-6]。但传统变压器受限于高压侧高电压,分接头级差小,调压范围小,不能实现快速宽幅调压^[7-8]。因此,为满足现代电网安全经济运行要求,亟需研究新型有载宽幅调压变压器,保障电力系统安全稳定运行。

当前,配电变压器有载分接开关(On-Load Tap Changer, OLTC)可分为机械式、电力电子式和混合式三类^[9-10],大量专家学者对其展开了研究。文献[11]提出一种基于绝缘栅双极晶体管(Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT)的电力电子式配电变压器 OLTC 电路结构和控制方案,其调压速度较机械式 OLTC 有很大提高。文献[12]针对传统调压装置结构复杂、切换过程冗长的问题,提出了分段式快速调压模型,去除过渡支路,精简了电路结构。文献[13]采用复合级联 H 桥结构作为 OLTC 拓扑,减少了调压绕组数量,扩大了调压范围。文献[14]建立了基于 IGBT 的混合式配电变压器模型,分析了所提模型的调压效果

及经济性,并通过仿真验证了所提模型的有效性。文献[15]提出一种基于 H_∞ 闭环控制的混合式配电变压器,其控制性能较传统比例积分(Proportional Integral, PI)控制有较大提升。然而,上述文献中的机械式、混合式 OLTC 均接在配电变压器高压侧,当发生电压宽幅跳变时,需要多次逐级调压才能达到调压要求,调压速度慢甚至调压范围不能满足电压跳变幅度。而电力电子式 OLTC 虽然调压速度能满足要求,但不适用于大容量的配电变压器,同时受到调压范围的限制。因此本文提出一种配电变压器低压侧的调压策略。配电变压器低压侧的电压低,对绝缘要求低,分接头级差能够设置得很大,可以为实现宽幅调压提供一定的条件。

由于配电变压器低压侧电流高、切换电流大^[16-17],因此机械式 OLTC 抽头易被电弧烧蚀、电力电子式 OLTC 通态损耗大的缺点被无限放大。同时,传统混合式 OLTC 需要在机械开关建立一定电弧能量的条件下才能实现电流转移,负载电流以电弧电流的形式延续,燃弧过程依然存在^[18-20],且配电变压器低压侧电流高,燃弧时间长,使这一问题更加凸显^[21-23]。因此,本文提出一种新型混合式低压侧快速宽幅调压模型,将 OLTC 接在配电变压器低压侧,并对传统混合式 OLTC 进行了改进,增加了逆变电源,强制电流由机械式直通支路向电力电子式换流支路切换,同时抵消电子开关的正向电压,机械开关彻底断电动作,解决了传统混合式 OLTC 电流转移速度取决于线路参数以及消弧不彻底的问题^[21]。通过仿真分析,验证了所提新型混合式低压侧快速宽幅调压模型的可行性与可靠性。

1 新型混合式低压侧快速宽幅调压模型设计

新型混合式低压侧快速宽幅调压模型如图 1 所示。图 1 中, $K_1 \sim K_4$ 为换流支路的电力电子开关; R_k 为过渡支路的电阻,用于限制环流; $K_{1,1} \sim K_{1,6}$ 和 S_1, S_2 为机械直通支路的机械开关。逆变电源为机械开关 S_1, S_2 提供零电压、零电流的动作环境,机械开关断电动作。

本文采用反并联晶闸管作为有载调压变压器

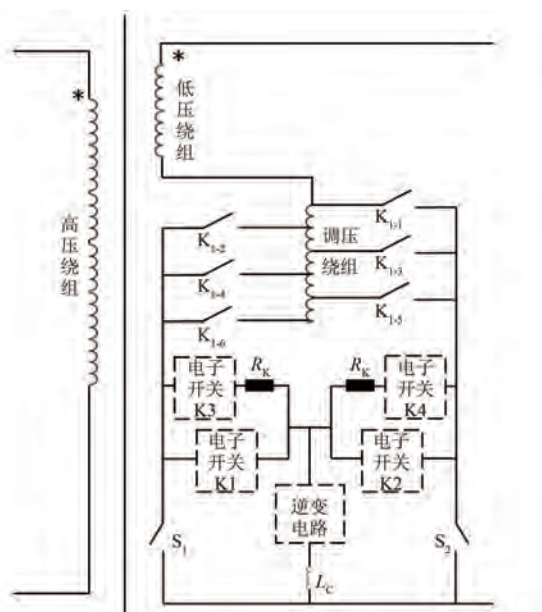


图1 新型混合式低压侧快速宽幅调压模型

Fig.1 Novel hybrid model for fast wide-range voltage regulation on low-voltage side

的电子开关。为了保证晶闸管的可靠运行,在反并联晶闸管两端并联阻容吸收回路。晶闸管型调压电子开关拓扑结构如图2(a)所示,包括2个反向并联的晶闸管 SCR1、SCR2 以及 RC 阻容吸收回路。反并联晶闸管实现双向通断;RC 阻容吸收回路中电容 C 吸收晶闸管关断期间的过电压,限流电阻 R 限制晶闸管导通期间的电容放电电流,保护晶闸管不被损坏^[24-25]。

逆变电源是实现负载电流强制换流、机械开关断电动作的关键。逆变电源拓扑结构如图2(b)所示,采用双 Buck 单相全桥电压源型正弦脉宽调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 逆变器。其中, L_r 为滤波电感; R_D 、 C_D 分别为隔流电阻、隔流电容,用于隔绝电流以及消除逆变桥产生的纹波电流; U_{DC} 为直流电源电压。

以抽头1向抽头2切换为例,介绍抽头切换过程各元件的通断状态。抽头切换主要分为5个步骤:①抽头切换前,机械开关 K_{1-1} 、 S_2 接入主电路,导通损耗小,如图3(a)所示;② t_1 时刻,接收到调压信号,导通电子开关 K_2 ,同时起动逆变电路为 S_2 提供零电压、零电流动作条件,电流由机械式直通支路(S_2)向电力电子式换流支路(K_2)转移,导通机械开关 K_{1-2} 、断开机械开关 S_2 ,如图3(b)所示,待 S_2 完全断开后关闭逆变电源,短路;

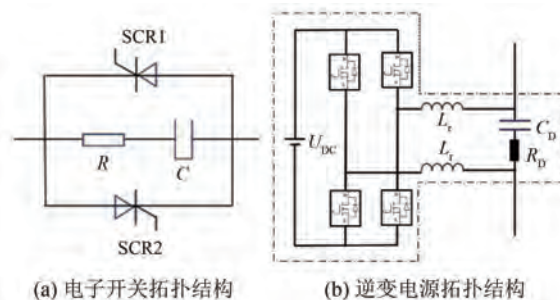


图2 元件拓扑结构设计

Fig.2 Component topology design

③ t_2 时刻,导通电子开关 K_3 ,过渡电阻限制环流,如图3(c)所示,同时断开电子开关 K_2 ,由于晶闸管过零关断,延迟 10 ms 断开机械开关 K_{1-1} ,如图3(d)所示;④ t_3 时刻,导通电子开关 K_1 ,过渡电阻被旁路,如图3(e)所示,起动逆变电路,为 S_1 提供零电压、零电流条件,导通机械开关 S_1 ;⑤ t_4 时刻,机械开关 S_1 导通完毕,断开 K_1 ,关闭过渡支路,机械开关 K_{1-2} 、 S_1 接入主电路,实现抽头切换,如图3(f)所示。由低档位向高档位切换的时序图如图4所示。

2 主要参数设计

2.1 晶闸管型电子开关

本文依据 SCB10-500kVA 型 10/0.4 kV 干式变压器选定晶闸管,变压器低压侧参考电流为

$$I = k \times \frac{S_N}{\sqrt{3} U_N} \quad (1)$$

式中: k 为考虑二次侧电流冲击等外部因素引入的可靠系数,取值范围为 1.2~1.5; S_N 为变压器额定容量; U_N 为变压器低压侧额定电压。

取 $k=1.3$,由式(1)计算可得晶闸管承受的参考电流为 938.19 A,峰值电流为 1 326.8 A,因此选择型号为 C440P 的晶闸管,其耐流为 1 400 A。

阻容吸收回路可吸收电路中的等效电感电容积蓄的能量,其参数大小与接入电路的漏感、绕组结构、分布电感电容以及晶闸管恢复特性等因素有关,因此很难获得准确的设计参数。当前阻容吸收回路的参数大多根据经验参数选取,ABB 公司建议的 R 和 C 推荐值分别为 1~10 Ω 和 0.5~4 μF 。本文选择 $R=1 \Omega$ 、 $C=3 \mu\text{F}$ ^[26]。

2.2 逆变电源

本文采用双 Buck 全桥逆变电路进行负载电

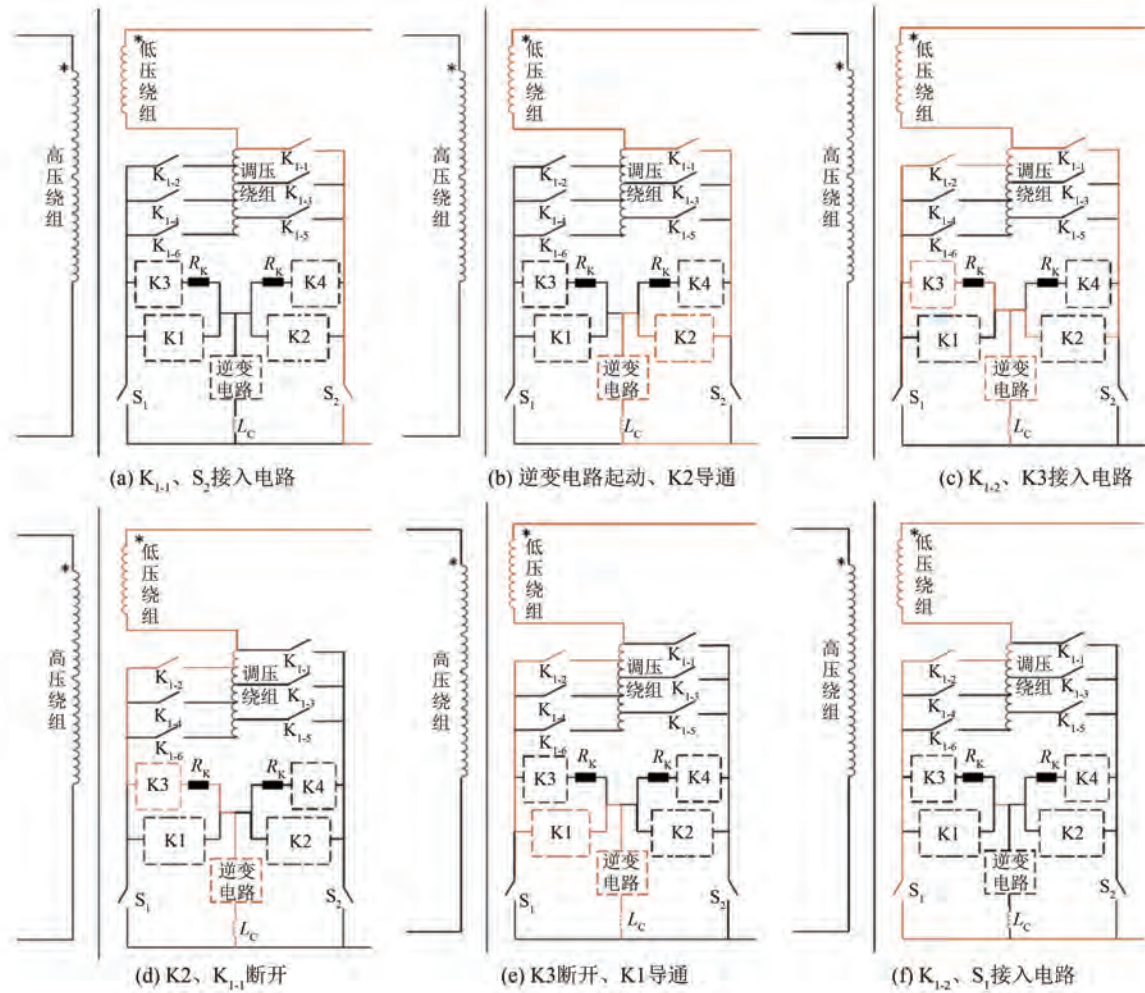


图 3 调压过程中各元件的状态

Fig. 3 States of components during voltage regulation

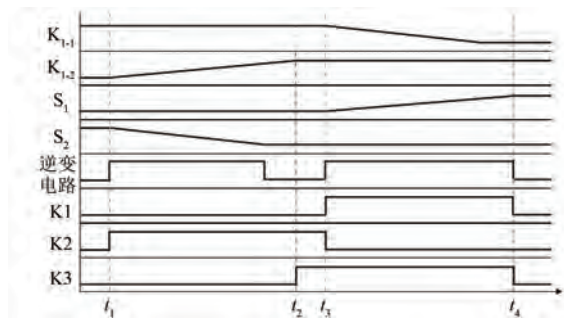


图 4 由低档位向高档位切换的时序图

Fig. 4 Timing diagram for switching from low to high gears

流的跟随,其拓扑结构如图 2(b)所示。逆变电路的输出包含大量高次谐波,分别在两个桥臂的输出端设置一个滤波电感,滤除高次谐波,抑制纹波。当逆变电路处于正半周工作时,可等效为一个 Buck 电路,其电感电流变化率为

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_{DC} - u_o(t)}{2L_r} \quad (2)$$

式中: u_o 为输出电压。

本文基于 SPWM 对逆变器进行控制,Buck 电路占空比呈正弦变化,则可以得到输出电流纹波表达式为

$$\Delta i = \frac{U_{DC} - u_o(t)}{2L_r} D(t) T \quad (3)$$

式中: Δi 为输出电流纹波; $D(t)$ 为占空比; T 为载波信号周期。

由于开关频率比基波频率大得多,所以一个开关周期的输出电压可表示为

$$u_o(t) = U_{DC} D(t) \quad (4)$$

因此,输出电流纹波可表示为

$$\Delta i = \frac{U_{DC} - u_o(t)}{2L_r} \times \frac{u_o(t)}{U_{DC}} T \quad (5)$$

由式(5)可知,当 $u_o = U_{DC}/2$ 时, Δi 取最大值。设计滤波电感参数时,选择最大输出电流纹波为输出电流峰值 I_{Lmax} 的 20%, 故 $\Delta i = 20\% I_{Lmax}$ 。选择逆变电源直流电压为 50 V, 开关频率为 20 kHz, 参考电流峰值为 1 326.8 A, 由式(5)计算可得 $L_r = 1.2 \mu H$ 。

基于电压电流双环竞争原理以及 SPWM 技术对逆变电源进行控制, 分流电路及控制框图分别如图 5 和图 6 所示。由图 5 可知, 机械支路处于零电压条件时, 逆变电源产生的电压需要对电子器件的正向导通压降进行跟随, 即:

$$V_K + V_D = 0 \quad (6)$$

$$V_A = V_L - V_K \quad (7)$$

式中: V_K 为晶闸管压降; V_D 为隔流阻容两侧压降; V_A 为逆变电源输出电压; V_L 为滤波电感的压降。

当机械支路处于零电流条件时, 逆变电源输出的电流需要对负载电流进行跟随, 即:

$$I_S = I_K \quad (8)$$

$$I_L = I_D - I_S \quad (9)$$

式中: I_S 为负载电流; I_K 为晶闸管支路电流; I_L 为逆变电源输出电流; I_D 为隔流阻容支路电流。

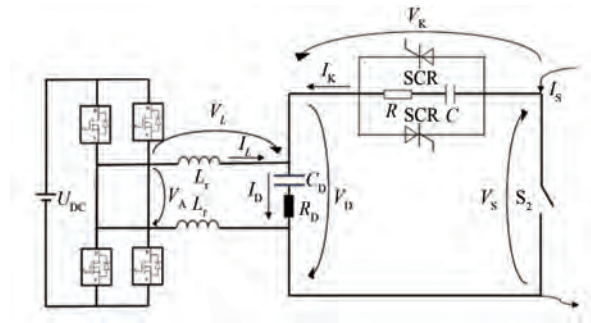


图 5 机械开关分流电路

Fig. 5 Current diverter circuit of mechanical switch

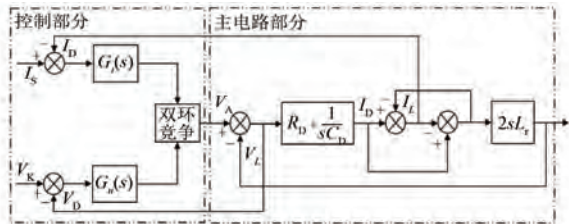


图 6 逆变电路控制框图

Fig. 6 Control block diagram of inverter circuit

电压环和电流环单独运算并进行竞争, 以结果小的作为环路的输出对脉宽调制占空比进行控

制。控制部分利用 SPWM 生成逆变桥的通断信号, 仿真中利用 PI 控制器代替传递函数 $G_i(s)$ 、 $G_u(s)$, 经过仿真调试, 选择 $k_{ip} = 1.2$ 、 $k_{ii} = 300$ 、 $k_{up} = 1.2$ 、 $k_{ui} = 300$ 。

2.3 过渡电阻

为了确保负载电流连续, 切换过程中两个电力电子器件会同时导通, 与调压绕组共同形成短路电流环路, 影响电力电子器件的正常通断。增加过渡电阻能够限制环流大小, 保证配电变压器抽头的正常切换, 过渡电阻阻值需要依据环流大小以及损耗确定。环流大小与过渡电阻、相邻抽头间的绕组电压以及线圈回路的等效电阻、等效电抗有关。由于切换电路接在配电变压器低压侧, 其电压低, 相邻抽头间的绕组电压很小, 故环流较小, 一般阻值的电阻均能满足限流要求。本文选择 1Ω 的过渡电阻。

2.4 机械开关建模

动态性能的研究需要对机械开关分合闸过程中产生的燃弧过程进行建模分析。由于目前尚无精确的电弧模型, 现有的电弧模型 (如 Mayr、Cassie 电弧模型) 受电弧电流影响较大^[27], 不能满足本文零电流动作的仿真要求, 并且对于动态过程的分析也不要求建立十分精确的电弧内部变化过程, 因此对机械开关进行等效简化建模, 通过可变电弧电阻模拟机械开关动作过程的电气特性。一般而言, 电弧电阻主要由电弧电压、电弧电流和开距决定^[28]。由于本文设计的机械开关是在零电压、零电流的条件下动作, 因此电弧电压、电流对电弧电阻的影响可以忽略不计。假设电弧电阻 r 与开距 s 成指数关系, 当开距达到 10 mm 时, 电弧电阻趋于无穷大。为了便于仿真, 选取机械开关断开时的电阻为 $1 G\Omega$, 近似为断开, 由此得到电弧电阻表达式为

$$r = e^{2.073s} \quad (10)$$

3 仿真分析

本文选择 SCB10-500kVA 型 10/0.4 kV 干式配电变压器, 调压范围为 $\pm 2 \times 10\%$, OLTC 接在配电变压器低压侧, 依据图 1, 在 Matlab/Simulink 中搭建三档新型混合式低压侧宽幅调压仿真模型。仿真中, 机械开关的分、合闸时间分别设置为 40 ms、60 ms, 采用可变电弧电阻代替机械开关。

仿真主要参数如表 1 所示。图 7 为额定电压向 +10% 挡位切换过程中配电变压器的输出电压和电流。低压侧额定相电压幅值为 326.6 V, 调压后低压侧电压近似为额定电压的 110%, 即 360.9 V; 调压后低压侧电流也为额定电流的 110%。配电变压器的输出电压、输出电流没有出现畸变, 实现了抽头的正常切换。

表 1 仿真模型参数

Tab. 1 Parameters of simulation model

参数名称		参数值
电网电压	电压/kV	10
	频率/Hz	50
缓冲吸收电路	电阻 R/Ω	1
	电容 $C/\mu\text{F}$	3
逆变电源	滤波电感 $L_r/\mu\text{H}$	7
	隔流电阻 R_D/Ω	0.5
	隔流电容 $C_D/\mu\text{F}$	100
	直流电源电压 U_{DC}/V	50
机械开关	分闸时间/ms	40
	合闸时间/ms	60

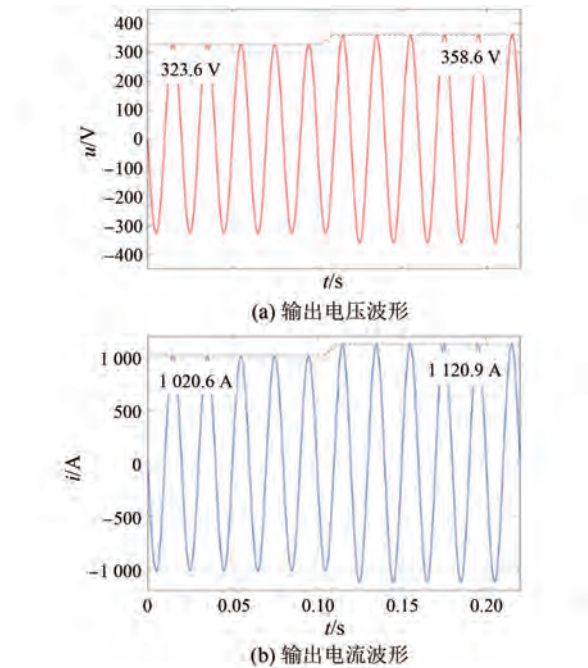


图 7 配电变压器输出电压、电流波形

Fig. 7 Output voltage and current waveforms of distribution transformer

3.1 机械开关零电流、零电压动作

图 8 为 $t=0.0425\text{ s}$ 时切换, 机械支路的电流

波形及其换流情况。切换过程中, 机械开关 K_{1-1} 在电力电子式开关 K2 关断后关断、机械开关 K_{1-2} 在电力电子式开关 K1 导通前导通, K_{1-1} 、 K_{1-2} 不需要借助逆变电源强制断电, 可以正常断电通断。而机械开关 S_1 、 S_2 需要利用逆变电源产生零电压、零电流条件, 再进行动作。由图 8(c) 可知, $t=0.0425\text{ s}$ 时, 电子换流支路中的逆变电源产生与负载电流同频、同相且等幅的交流电流, 迫使负载电流强制换流到电子换流支路, S_2 零电流断开。同样地, $t=0.1125\text{ s}$ 时, S_1 导通, 同时逆变电源产生叠加电流, 负载电流全部由电子换流支路通过, S_1 零电流导通。

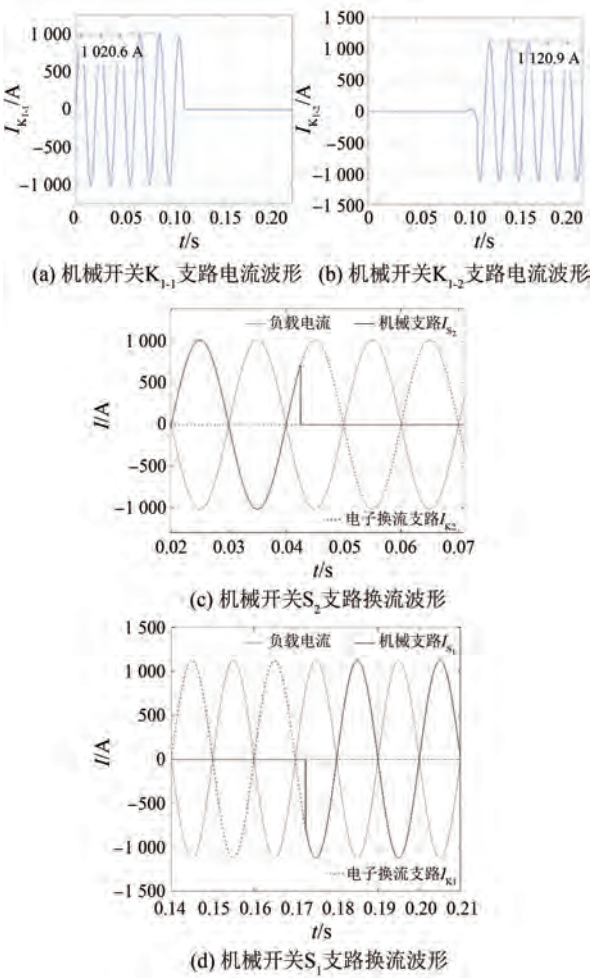


图 8 机械支路电流波形图

Fig. 8 Current waveforms of mechanical branch

图 9 为逆变电源的电压控制情况以及机械支路的电压波形。由图 9(a) 可知, 在 $0.0425\text{ s} \sim 0.0825\text{ s}$ 时段, 电子开关 K2 导通并存在导通压降, 逆变电源对电子开关的导通压降进行跟随并

抵消, S_2 零电压动作, 如图 9(b) 所示。同样地, 在 0.112 5~0.172 5 s 时段, S_1 零电压动作。

图 10 为机械支路电流、电压波形的局部放大图。 S_2 在 $t=0.0425$ s 时断开, 存在 1 V 的电流冲击, 其余时段均能实现零电流动作。在整数倍半周期时刻, 机械开关的端电压均出现了小于 0.2 V 的电压尖峰, 这是由于电子开关中的反并联晶闸管在电流过零点换向, 导致电压反向。

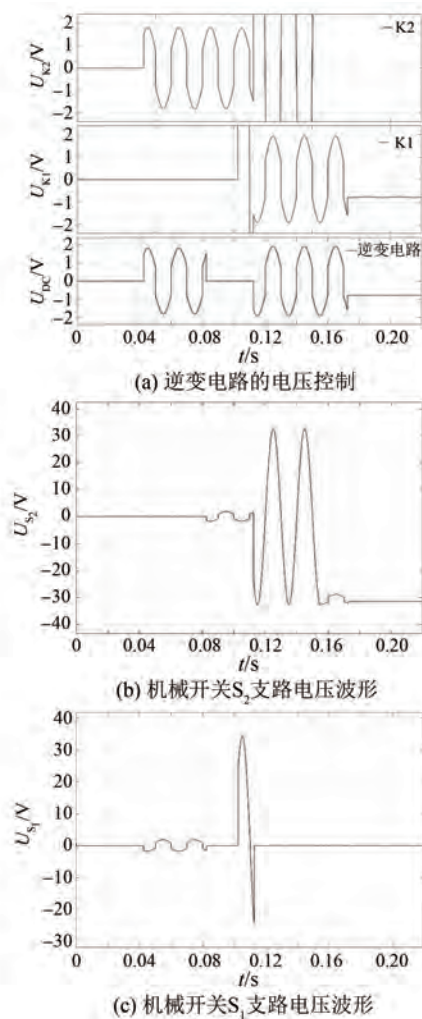


图 9 机械支路电压波形图

Fig. 9 Voltage waveforms of mechanical branch

3.2 调压时间

本文所提调压模型能够实现宽幅调压。在调节速度方面, 传统混合式 OLTC 接在配电变压器高压侧, 分接头级差小, 需要逐级调压, 10 kV 变压器的相邻抽头间绕组电压一般为 $1.25\% U_N$ 或 $2.5\% U_N$ 。而本文所提低压侧宽幅调压模型, 绕组电压可以设置为 $10\% U_N$ 及以上。当同时调节

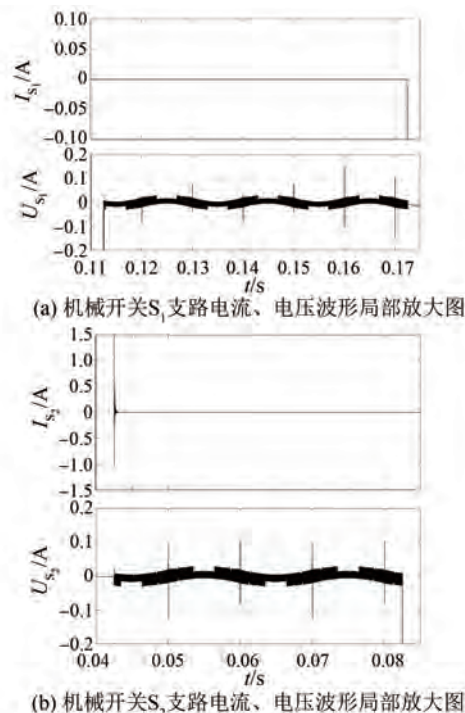


图 10 机械支路电流、电压波形局部放大图

Fig. 10 Locally enlarged view of current and voltage waveforms of mechanical branch

10% 电压幅度时, 与传统混合式 OLTC 相比, 本文所提低压侧宽幅调压模型的调压时间至少能够缩短 4 倍, 大大加快了调压速度。特别是随着光伏和电动汽车大量接入电网, 电压宽幅跳变成为了常态, 对变压器调节幅度、调节速度提出了更高的要求。

3.3 消弧性能

传统混合式 OLTC 需要机械开关为电子换流开关建立一定的电弧电压, 换流过程中的燃弧现象必然存在, 而低压侧高电流大大增加了燃弧时间。同时电弧会不断烧蚀机械触头上的材料, 产生电弧能量, 缩短机械触头的使用寿命。采用机械开关切换过程中产生的电弧能量表征机械触头的使用寿命, 耗散的电弧能量越大, 触头损耗就越大。第 i 次开断时的电弧能量计算式为

$$E_i = \int_{t_1}^{t_2} u(t) i(t) dt \quad (11)$$

式中: $u(t)$ 、 $i(t)$ 分别为机械开关的电压、电流; t_1 、 t_2 分别为电弧起、止时刻。

采用机械触头剩余电弧能量表征机械开关的剩余使用寿命, n 次开断后机械触头的剩余使用寿命指数预估为

$$P = \frac{E_{\text{arc}} - \sum_{i=1}^n E_i}{E_{\text{arc}}} \quad (12)$$

式中： $\sum_{i=1}^n E_i$ 为 n 次开断时耗散的累计电弧能量； E_{arc} 为机械开关的额定电弧能量阈值，本文取 40 kJ。

为了比较不同混合式 OLTC 的电流转移过程对机械触头使用寿命的影响,本文对传统混合式 OLTC 进行了仿真建模,用 Cassie 电弧模型模拟机械开关的通断特性,电子换流开关采用反并联晶闸管,仿真参数与图 1 中的宽幅调压模型一致。在电流峰值时刻($t=0.045\text{ s}$)切换,电流转移波形如图 11 所示。由于配电变压器低压侧电流较高,燃弧时间较长,此时燃弧时间约为 458 μs 。

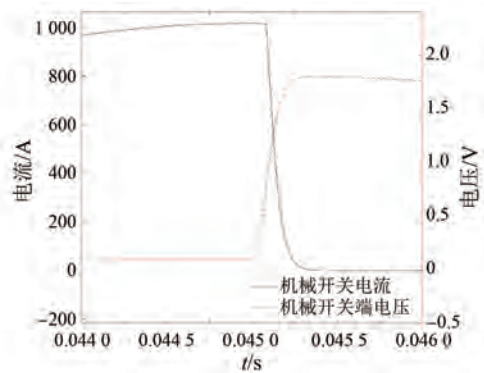


图 11 机械开关电流转移波形

Fig. 11 Current commutation waveforms of mechanical switch

表 2 为传统混合式模型和本文所提新型混合式低压侧快速宽幅调压模型在切换过程中产生的电弧能量以及机械触头的剩余使用寿命对比。不同切换时刻产生的电弧能量不同,电流峰值时刻(90°)切换产生的电弧能量最大。传

表 2 不同混合式开关机械触头使用寿命比较

Tab. 2 Comparison of mechanical contact service life between different hybrid switches

开关种类	单次电弧能量/J			剩余使用寿命指数 $P/\%$		
	30°	60°	90°	10 万次	20 万次	30 万次
传统混合式模型	0.044 8	0.086 3	0.117 2	79.3	58.6	37.9
本文所提宽幅调压模型	0.001 3	0.003 2	0.006 7	99.1	98.2	97.2

统混合式模型的平均电弧能量为 0.082 8 J;本文所提模型的平均电弧能量为 0.003 7 J,是传统混合式模型的 4.5%。不考虑其他损耗,当进行 30 万次开关开断后,传统混合式模型开关的剩余使用寿命指数仅为 37.9%,此时需要进行机械触头的检查维修,预防事故发生;而本文所提新调压模型开关的剩余使用寿命指数为 97.2%,触头的损坏较少,无需检查更换。

4 结语

本文提出了一种新型混合式低压侧快速宽幅调压模型及其参数设计方法,通过理论分析和仿真测试,验证了元件参数设计的有效性,得到如下结论。

(1)结合低压侧调压特点,综合比较机械式、电力电子式和混合式 OLTC 的特性,提出了新型混合式低压侧快速宽幅调压模型。所提新型调压模型利用逆变电路为机械开关动作产生零电压、零电流条件,实现机械开关断电动作,解决了传统混合式结构机械触头消弧不彻底的问题,有效延长了配电变压器的使用寿命。

(2)本文所提低压侧调压模型能够实现宽幅调压,大大缩减了调压时间,与传统混合式调压模型相比,调压时间至少缩短了 4 倍。

(3)新型调压模型开关切换产生的电弧能量较小,是传统混合式调压模型的 4.5%。当进行 30 万次开关动作后,本文所提模型的机械触头损耗很小,使用寿命指数为 97.2%;而传统混合式开关的寿命指数仅为 37.9%,需进行触头的检修维护。

本文所提新型混合式低压侧调压方法能够实现快速宽幅低损调压,但在实际工程应用中,逆变电源增加的额外成本以及复杂控制系统带来的稳定性问题将限制其大规模应用,后续研究应聚焦于降低器件成本,同时进一步提升系统可靠性。

利益冲突声明

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors disclose no relevant conflict of interests.

作者贡献

刘庆龙进行了研究设计、数据分析与论文撰

写,傅裕斌、薄海旺进行了试验操作、数据收集与验证,王永华进行了文献综述、论文修订及语言润色,刘轩东提供关键研究指导、论文的审核与修改。所有作者均阅读并同意了最终稿件的提交。

The research design, data analysis, and paper writing were conducted by Liu Qinglong. The experimental operations, data collection, and verification were conducted by Fu Yubin and Bo Haiwang. The literature review, paper revision, and language polishing were conducted by Wang Yonghua. The key research guidance, paper review and revision were conducted by Liu Xuandong. All authors have read and approved the final version of the paper for submission.

参考文献

- [1] 任景,薛晨,张小东,等. 含储能及分布式电源的区域电网平衡[J]. 电网与清洁能源, 2020, 36(12): 75-82.
- REN J, XUE C, ZHANG X D, et al. Research on regional power grid balance containing energy storage and distributed generation [J]. Power System and Clean Energy, 2020, 36(12): 75-82.
- [2] 贺之渊,杨杰,吴亚楠,等. 能源转型下的未来交流和直流联合运行模式及发展趋势探讨[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(1): 99-114.
- HE Z Y, YANG J, WU Y N, et al. Investigation on the future AC and DC combined operation form and development trend under energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 43(1): 99-114.
- [3] 陈国平,董昱,梁志峰. 能源转型中的中国特色新能源高质量发展分析与思考[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5493-5506.
- CHEN G P, DONG Y, LIANG Z F. Analysis and reflection on high-quality development of new energy with Chinese characteristics in energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5493-5506.
- [4] KROPOSKI B, JOHNSON B, ZHANG Y C, et al. Achieving a 100% renewable grid: Operating electric power systems with extremely high levels of variable renewable energy [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2017, 15(2): 61-73.
- [5] 严蓓兰. 新能源汽车电机发展趋势及测试评价研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(6): 109-116.
- YAN B L. Development trend and test evaluation research of new energy vehicle motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2018, 45(6): 109-116.
- [6] 曹帅,吴鑫,刘锦玉,等. 光储联合发电系统调度优化控制策略[J]. 电机与控制应用, 2023, 50(7): 89-94.
- CAO S, WU X, LIU J Y, et al. Scheduling optimization and control strategy of optical storage combined power generation system [J]. Electric Machines & Control Application, 2023, 50(7): 89-94.
- [7] 宋冬冬,程林,林志法,等. 有载分接开关中电力电子技术应用综述[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(8): 45-55.
- SONG D D, CHENG L, LIN Z F, et al. Summary of the application of power electronics technology in on-load tap switches [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(8): 45-55.
- [8] 王蕾,袁洪跃,王季琴,等. 变压器有载分接开关技术和故障诊断发展现状及展望[J]. 高压电器, 2022, 58(3): 171-180.
- WANG L, YUAN H Y, WANG J Q, et al. Development status and prospect of transformer on-load tap-changer technology and fault diagnosis [J]. High Voltage Appliances, 2022, 58(3): 171-180.
- [9] 王鹤,栾钧翔. 变压器的电力电子化演进及其对电压稳定影响综述[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 171-187.
- WANG H, LUAN J X. Summary of power electronic evolution of transformer and its influence on voltage stability [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 171-187.
- [10] 宋冬冬,董彪,李鹏程,等. 不同机电混合式有载分接开关工作特性实验研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 208-213.
- SONG D D, DONG B, LI P C, et al. Different electromechanical hybrid on-load tap-changer job characteristics experimental study [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 208-213.
- [11] 周念成,苏宇,王强钢,等. 基于IGBT的配电变压器有载调压开关参数设计及分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 35-42+67.

- ZHOU N C, SU Y, WANG Q G, et al. Parameter design and analysis of IGBT-based on-load tap changers for distribution transformer [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 35-42+67.
- [12] 宋开胜, 马宏忠, 王华芳, 等. 基于晶闸管的分段式快速调压模型的设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 135-141.
- SONG K S, MA H Z, WANG H F, et al. Design of a segmented rapid voltage regulation model based on thyristors [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 135-141.
- [13] 王春霖, 刘畅, 杨华, 等. 基于复合开关级联 H 桥结构的有载调压配电变压器[J]. 高电压技术, 2022, 48(5): 1987-1996.
- WANG C L, LIU C, YANG H, et al. On-load tap changer distribution transformer based on hybrid-switch cascaded H-bridge structure [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(5): 1987-1996.
- [14] 方健, 方敏, 欧国东, 等. 混合式配电变压器有载调压开关的结构与参数设计[J]. 南方电网技术, 2019, 13(11): 61-68+82.
- FANG J, FANG M, OU G D, et al. Parameter and structure design of hybrid on-load tap changer for distribution transformer [J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(11): 61-68+82.
- [15] 高亚晨, 梁得亮, 李大伟, 等. 一种基于 H_{∞} 闭环控制器的混合式配电变压器[J]. 电工技术学报, 2021, 36(增刊 2): 688-695.
- GAO Y C, LIANG D L, LI D W, et al. A hybrid distribution transformer with H_{∞} closed loop controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(S2): 688-695.
- [16] 陈朋, 李磊, 颜世凯. 基于电力电子器件的配电变压器有载调压技术研究[J]. 变压器, 2021, 58(2): 30-35.
- CHEN P, LI L, YAN S K. Research on on-load tap-changing technology of distribution transformer based on power electronic devices [J]. Transformer, 2021, 58(2): 30-35.
- [17] 江丹宇, 杨贤, 韩正家, 等. 有载分接开关切换过程的试验研究[J]. 电工材料, 2023, (1): 6-10.
- JIANG D Y, YANG X, HAN Z J, et al. Experimental research on the switching process of on-load tap changer [J]. Electrical Engineering Materials, 2023, (1): 6-10.
- [18] 王绍武, 李鹏, 李金忠, 等. 变压器真空有载分接开关研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(18): 6893-6908.
- WANG S W, LI P, LI J Z, et al. Overview of transformer vacuum-type on-load tap changers [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6893-6908.
- [19] 高桂英, 董锐, 夏小晴, 等. 电力电子技术在有载分接开关中应用研究[J]. 电气传动, 2021, 51(6): 73-80.
- GAO G Y, DONG R, XIA X Q, et al. Study on power electronics application in on-load tap changer [J]. Electric Drive, 2021, 51(6): 73-80.
- [20] 梁贵书, 晏阔, 高飞, 等. 变压器混合式有载分接开关熄弧方法的仿真及试验研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3156-3163.
- LIANG G S, YAN K, GAO F, et al. Study on simulation and experiments of method of extinction hybrid on-load tap changer in transformers [J]. High Voltage Technology, 2014, 40(10): 3156-3163.
- [21] 钟建英, 孙广雷, 杨葆鑫, 等. 高电压等级真空断路器研究现状及展望[J]. 高电压技术, 2024, 50(2): 451-466.
- ZHONG J Y, SUN G L, YANG B X, et al. Research status and prospect of high voltage vacuum circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(2): 451-466.
- [22] 宋冬冬, 董彪, 李鹏程, 等. 机电混合式有载分接开关电弧电流转移过程[J]. 高电压技术, 2020, 46(6): 2164-2175.
- SONG D D, DONG B, LI P C, et al. Arc current transfer process in hybrid electromechanical on load tap-changer [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6): 2164-2175.
- [23] 邵宇航, 吕晓露, 李金忠, 等. 电弧故障时分体式有载分接开关结构失效风险仿真研究[J]. 西安交通大学学报, 2024, 58(7): 129-138.
- SHAO Y H, LV X L, LI J Z, et al. Simulation study on the risk of structural failure in separate type on-load tap changers during are faults [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 58(7): 129-138.
- [24] 刘欣, 王利桐, 梁贵书, 等. 高压直流断路器组件内 IGBT 关断瞬态电压过冲的关键影响参数[J]. 高电压技术, 2020, 46(8): 2654-2662.
- LIU X, WANG L T, LIANG G S, et al. Key influencing factors on the turn-off transient voltage

- overshoot of IGBT in the module of high voltage DC circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(8): 2654-2662.
- [25] 刘晓明, 于新超, 陈海, 等. 阻容型混合式直流断路器优化设计及全工况开断性能分析[J]. 电网技术, 2024, 48(12): 5149-5158.
- LIU X M, YU X C, CHEN H, et al. Optimized design and full operation breaking performance analysis of resistance capacity hybrid DC circuit breakers [J]. Power System Technology, 2024, 48(12): 5149-5158.
- [26] 宋冬冬, 丁来伟, 董彪, 等. 机械式有载分接开关改进方案的设计与研究[J]. 高电压技术, 2019, 45(7): 2141-2149.
- SONG D D, DING L W, DONG B, et al. Design and research on the improvement scheme of purely mechanical on-load tap-changers [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2141-2149.
- [27] 张彪, 周申培, 吴细秀, 等. 配电网间歇性重燃电弧模型的建立与断续弧光接地故障特征分析研究[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 2207-2217.
- ZHANG B, ZHOU S P, WU X X, et al. Establishment of intermittent reignition arc model and analysis of intermittent arcing ground faults in distribution network [J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 2207-2217.
- [28] 朱童, 余占清, 曾嵘, 等. 混合式直流断路器模型及其操作暂态特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 18-30.
- ZHU T, YU Z Q, ZENG R, et al. Transient model and operation characteristics researches of hybrid DC circuit breaker [J]. Proceeding of the CSEE, 2016, 36(1): 18-30.

收稿日期:2025-01-04

收到修改稿日期:2025-03-03

作者简介:

刘庆龙(2000-),男,硕士研究生,研究方向为电能质量控制技术,qinglongliu@stu.xjtu.edu.cn;

* 通信作者:刘轩东(1981-),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定性分析与控制、高电压绝缘与放电等离子体,liuxuand@xjtu.edu.cn。