**DOI**：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.7.232 **中图分类号**：TM86 **文献标志码**：A

# 结合无功功率自适应调节和 A-LADRC 的 HPFC 过电压抑制策略

吴 鹏[1]，赵彭辉[1]，袁新成[2]，孟建辉[2]
(1.国网河北省电力有限公司经济技术研究院，石家庄 050000；2.新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学)，保定 071003)

**摘要**：混合潮流控制器 HPFC(hybrid power flow controller)将移相变压器 PST(phase-shifting transformer)与电压源型换流器 VSC(voltage source type converter)优势互补，实现对系统潮流的精确连续调节，但存在不同故障下换流器交流母线处的过电压问题。首先，为抑制故障引起的过电压，提出一种针对不同过电压水平自适应反向输送无功功率以补偿电压的策略，并针对故障初始阶段传统控制器调节速度慢引起的短时过电压情况，设计了一种控制器带宽参数自适应调节的线性自抗扰控制 A-LADRC(adaptive linear active disturbance rejection control)方法，实现了对 HPFC 故障下全过程的过电压抑制。然后，分析了 HPFC 的工作过程和过电压发生机理，明确了 HPFC 产生过电压最严重的场景，并从控制方法层面设计了相关的策略和参数。最后，基于 RT-LAB 实时仿真机和数字信号处理 DSP(digital signal processor)控制器，搭建了控制器级的硬件在环实验仿真平台，验证了所提 HPFC 过电压抑制策略的有效性和优越性。

**关键词**：混合潮流控制器 HPFC；自适应调节；线性自抗扰；过电压抑制

# HPFC Overvoltage Suppression Strategy Combined with Reactive Power Adaptive Regulation and A-LADRC

WU Peng[1], ZHAO Penghui[1], YUAN Xincheng[2], MENG Jianhui[2]
(1. Economic and Technological Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China;
2. State Key Laboratory of New Energy Power System (North China Electric Power University), Baoding 071003, China)

**Abstract:** A hybrid power flow controller (HPFC) combines a phase-shifting transformer (PST) with a voltage source type converter (VSC). The combination of VSC can achieve accurate and continuous regulation of the system power flow, but there are overvoltage problems at the AC bus of the converter under different faults. First, in order to suppress the overvoltage caused by fault, a strategy of adaptive reverse transmission of reactive power to compensate voltage for different overvoltage levels is proposed, and the short-time overvoltage caused by the slow regulation speed of traditional controllers is addressed. An adaptive linear active disturbance rejection control (A-LADRC) method for adaptive adjustment of controller bandwidth parameters is designed and thereby the whole process of HPFC fault overvoltage suppression is realized. Then, the working process and overvoltage mechanism of HPFC are analyzed, the most serious scenarios of HPFC overvoltage are identified, and the related strategies and parameters are designed from the level of control methods. Finally, based on RT-LAB real-time simulator and digital signal processor (DSP) controller, a controller-level hardware-in-the-loop simulation platform is built to verify the effectiveness and superiority of the proposed HPFC overvoltage suppression strategy.

**Keywords:** Hybrid power flow controller (HPFC); adaptive adjustment; linear active disturbance rejection; overvoltage suppression

**收稿日期**：2024-08-02；**修回日期**：2024-09-06；**录用日期**：2024-09-19；**网络首发日期**：2024-09-27
**基金项目**：国网河北省电力有限公司科技资助项目(SGHEJY00SJJS2310140)
This work is supported by State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Science and Technology under the grant SGHEJY00SJJS2310140

采用混合潮流控制器 HPFC(hybrid power flow controller)调控潮流，将移相变压器 PST(phase-

shifting transformer)与电压源型换流器 VSC(voltage source type converter)结合。相较于统一潮流控制器 UPFC(unified power flow controller)，HPFC 过载能力更强、造价更低，且 HPFC 既可以利用 PST 降低因电力系统异常对 VSC 过电压和过电流的冲击，也能发挥 PST 调节容量大和 VSC 调节速度快、精度高的优点，有效提升电网关键断面输送能力，缓解区域潮流不均衡局面，确保交流输电网络潮流通道畅通，可有力改善电网线路动态性能[1-2]。但 HPFC 这种由传统电磁设备和电力电子设备结合的新型设备的过电压特性更为复杂[3]，其中 VSC 属于电力电子设备，内部模块耐压能力有限，承受过电压应力幅值小、时间短，当发生过电压时易损坏，从而结束运行[4]。因此，实际应用时需要较好地解决 HPFC 关键设备 VSC 的过电压问题。

目前，针对 HPFC 过电压问题的研究主要围绕控制和绝缘配置展开。文献[5]和文献[6]分析了 PST 暂态过电压发生机理，从控制层面提出常规场景下的过电压修正方法，但该方法缺乏对不同故障工况下的过电压抑制；文献[7]和文献[8]针对不同故障下的过电压提出控制换流器功率分配与换流器关断，实现对过电压的抑制，但控制难度大[9]；文献[10]提出通过无功电流补偿抑制过电压，降低了控制难度但调节速度慢；文献[11]提出一种无功功率分散协同抑制过电压的方法，抑制效果明显，但仍存在一定的控制难度；文献[12-14]在分析 UPFC 过电压特性的基础上设计了绝缘保护以抑制过电压，但依靠绝缘保护抑制过电压的灵活性及动态响应能力较差，且绝缘配置成本高。因此，在 HPFC 关键设备 VSC 出现过电压时[14-16]，从控制层面寻找简单有效的过电压抑制策略具有较高的实际价值。

HPFC 内部 VSC 这类电力电子设备具备快速响应能力。VSC 控制采用传统比例积分 PI (proportional integral)调节的方式[17-19]，在采用相关过电压抑制方法后，存在过电压抑制初始阶段控制器调节速度慢引起的短时过电压问题。而自抗扰控制 ADRC(active disturbance rejection control)技术是在传统比例积分微分 PID(proportional integral derivative)控制策略的基础上发展起来的[20]，具有良好的抗干扰性能[21]。通过将 ADRC 进行线性化处理[22]，可以简化控制器的参数设计，加快系统的动态响应速度，同时保留原有控制器的优势[23]。文献[24]将线性自抗扰控制 LADRC(linear active disturbance rejection control)应用于配电网逆变器的控制，并证明了其在稳定性、动态响应速度和抗干扰性方面的卓越表现；但在处理如 HPFC 这样的复杂非线性系统时，由于控制参数具有固定性，当面对不断变化的过电压时，其控制效果可能不尽如人意[25-27]。因此，探索如何增强 LADRC 的调节灵活性具有重要的研究价值。

为了解决上述问题，本文在分析不同故障下 HPFC 内部 VSC 交流母线过电压发生机理的基础上，从控制层面提出一种针对不同过电压水平自适应反向输送无功功率抑制过电压的策略。为了提高过电压抑制初始阶段的调节速度，设计一种根据 VSC 输出无功功率反馈值自适应调节控制器带宽参数的线性自抗扰控制 A-LADRC(adaptive linear active disturbance rejection control)方法。此外，通过 RT-LAB 实时仿真机和数字信号处理 DSP(digital signal processor)控制器搭建硬件在环实验仿真平台，对所提策略进行验证。

## 1　HPFC 拓扑结构及基本原理

### 1.1　HPFC 拓扑结构

本文采用一种新型拓扑结构，如图 1 所示。其中，PST 为双芯对称 PST，由串联变压器 ST(series transformer)与励磁变压器 ET(excitation transformer)组成：ST 一次侧串联于输电线路，二次侧采用三角形连接；ET 一次侧与二次侧均采用星型连接。PST 串联于输电线路中，通过改变串入输电线路的电压来调节输电线路 L 端电压，达到调节潮流的目的。

在 ET 的二次侧，将 VSC 进行串联，与 PST 配合使用，可以对系统潮流进行精细调节。HPFC

充分利用 PST 的特性来减轻系统异常情况下对 VSC 可能产生的过电压冲击，从而为 VSC 提供必要的保护。

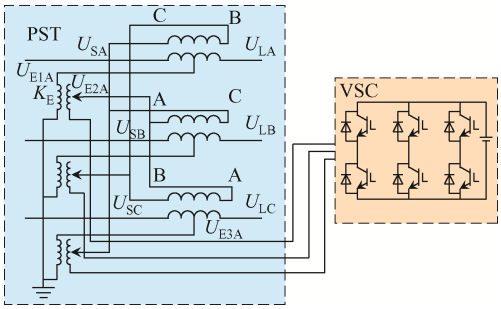



**图 1 HPFC 拓扑结构**

**Fig. 1 HPFC topology**

### 1.2 HPFC 工作原理

HPFC 的工作原理如图 2 所示。

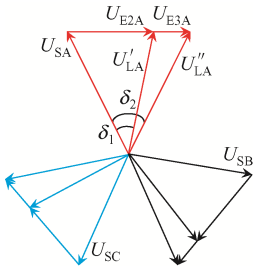



**图 2 HPFC 工作原理**

**Fig. 2 HPFC working principle**

以 A 相为例，ET 从输电线路获取电压，ET 一次侧、二次侧电压分别为 $U_{E1A}$、$U_{E2A}$，PST 两端电压分别为 $U_{SA}$、$U_{LA}$，两端电压差为 $e^{j\delta}$，ST 串入输电线路的补偿电压为 $U_{stA}$，各参数的表达式及其关系分别为

$$U_{stA}=K_S(U_{E2C}-U_{E2B}) \tag{1}$$

$$U_{E2A}=K_E U_{E1A} \tag{2}$$

$$U_{SA}-U_{LA}=U_{stA} \tag{3}$$

$$U_{SA}=U_{LA}e^{j\delta} \tag{4}$$

式中：$K_S$ 为 ST 变比；$U_{E2B}$、$U_{E2C}$ 分别为 ET 二次侧 B 相、C 相电压；$K_E$ 为 ET 变比。通过调节 ET 抽头改变 $K_E$，进而改变 $U_{E2A}$；再通过调节 $K_S$ 改变串入线路的电压，进而改变线路潮流。但 PST 每个档位调节的功率为固定值，加设 VSC 设备后组成的含 VSC 的 HPFC 可以利用 VSC 输出电压的可调特性，将 VSC 交流母线处电压 $U_{E3A}$ 与 $U_{E2A}$ 同轴叠加，进一步调节 ET 返回给线路的电压，进而调整 $e^{j\delta}$，从而实现对潮流的连续精确调节。

如图 2 所示，当 PST 独立工作时，线路两端相位差为 $\delta_1$，而目标功率对应的相位差为 $\delta_2$；VSC 投入时，VSC 输出与 $U_{E2A}$ 同相位的电压，使线路两端相位差达到目标值 $\delta_2$，进而使线路潮流达到目标值。大容量 PST 进行主要的潮流调节、小容量 VSC 进行微调，两者的协同作用可以实现对线路潮流的精确、平稳控制，使安全性和可靠性指标更佳，同时便于运行维护。

## 2 HPFC 故障过电压特性分析

HPFC 内部 VSC 交流母线处的暂态过电压来源主要有外部交流系统故障和 HPFC 内部故障。这种暂态过电压现象不仅与具体的故障类型和发生位置紧密相关，还受控制保护策略的影响。为了深入探究这一问题，本文以 A 相为例，对 HPFC 关键设备 VSC 交流母线上可能因故障工况出现的过电压情况进行了详细的分析和研究，仿真主电路及故障位置如图 3 所示。设线路目标功率潮流 $P_{ref}$ = 400 MW，故障持续时间为 2.0~2.5 s。图中：$I_{SA}$ 和 $I_{VA}$ 分别为 ET 二次侧与 ST 和 VSC 连接线路的电流；$Q_E$、$Q_S$、$Q_v$ 分别为 ET 从线路吸收的无功功率、ET 向 ST 传输的无功功率和 VSC 输出的无功功率。

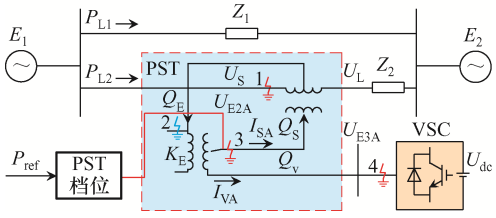


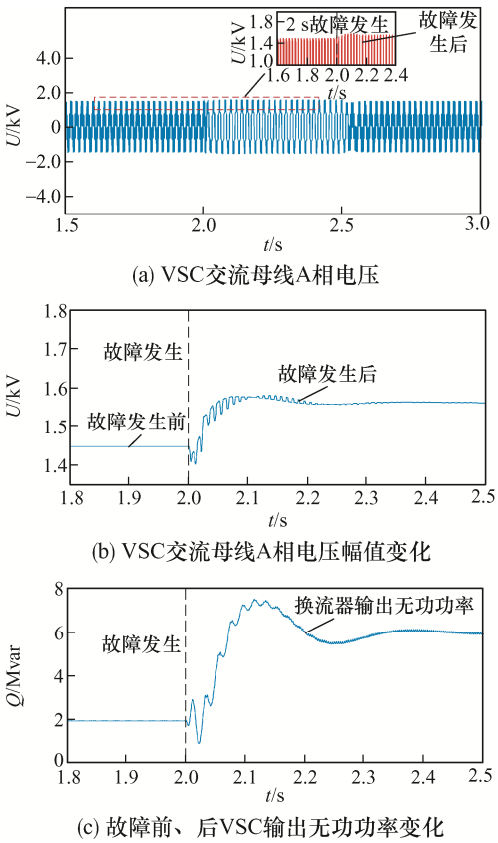

**图 3 HPFC 主电路及故障位置示意**

**Fig. 3 Schematic of HPFC main circuit and fault location**

### 2.1 外部交流系统故障下的过电压研究

当交流系统网侧发生单相或两相接地短路故障时，网侧出现的零序电压因 ST 采用 Dy 接线无

法经 ST 影响到阀侧。ET 二次侧故障相电压减小到接近 0、非故障相电压增大，此时 $U_{E3A}>U_{E2A}$，无功功率由 VSC 交流母线流向 ET，$U_{E3A}$ 减小。因此本文主要研究网侧三相短路接地故障(图 3 中的 1 处，故障工况 1)下的过电压情况。以 A 相为例，过电压情况如图 4 所示。




(a) VSC交流母线A相电压

(b) VSC交流母线A相电压幅值变化

(c) 故障前、后VSC输出无功功率变化

**图 4　故障工况 1 下的 A 相 VSC 交流母线电压及 VSC 输出无功功率变化**

**Fig. 4 Changes of phase-A VSC AC bus voltage and output reactive power under fault condition 1**

故障所在线路的三相电压减小至 0；ET 一次侧因三相耦合，其三相电压减小至接近 0；$U_{E2A}$ 也迅速减小至接近 0；$I_{VA}$ 迅速增大；返回到线路的 $U_{stA}$ 减小。故 ET 向 ST 传输的无功功率大幅减少、VSC 消耗的无功功率增多，此时 VSC 交流母线处出现暂态过电压。系统内部无功功率的关系为

$$Q'_{E}=Q'_{S}+Q'_{v} \tag{5}$$

式中，$Q'_{E}$、$Q'_{S}$、$Q'_{v}$ 分别为故障时，ET 从线路吸收的无功功率、ET 向 VSC 交流母线处传输的无功功率、逆变器消耗的无功功率。

VSC 交流母线处的过电压随 VSC 消耗无功功率的增多而增大。相对于正常工况，过电压期间 VSC 消耗的无功功率多出$\Delta Q_{v}$，可表示为

$$\Delta Q_{v}=Q'_{v}-Q_{v} \tag{6}$$

此时(故障后)，VSC 交流母线处电压约为

$$U'_{E3A}=\sqrt{\left(U_{E3A}+\frac{\Delta Q_{v}X}{U_{E3A}}\right)^{2}+\left(\frac{\Delta PX}{U_{E3A}}\right)^{2}} \tag{7}$$

式中：$\Delta P$ 为故障时 VSC 交流母线处的有功功率变化量；$X$ 为 ET 至 VSC 交流母线等效的交流系统阻抗。

由于有功功率变化量对交流电压的影响远小于无功功率，故可忽略有功功率变化量的影响。$\Delta Q_{v}$ 对 VSC 交流母线的影响可近似表示为

$$U'_{E3A}=U_{E3A}+\frac{\Delta Q_{v}X}{U_{E3A}} \tag{8}$$

为调节线路潮流，VSC 向 PST 补偿的电压增多，换流器交流母线处过电压进一步增大；VSC 吸收更多的无功功率，且吸收的无功功率越多，过电压水平越高。

### 2.2　HPFC 内部故障过电压研究

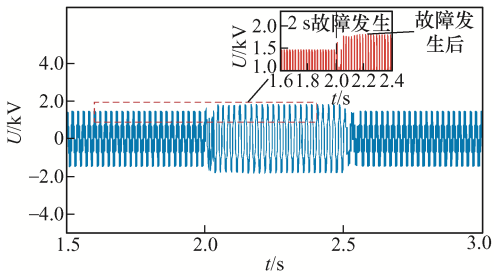
当 ET 一次侧发生单相接地故障时，与网侧单相接地故障类似，此时无功功率由 VSC 交流母线流向 ET，VSC 交流母线处电压减小。因此，本节主要研究 ET 一次侧(图 3 中的 2 处)两相短路接地故障(故障工况 2)与三相短路接地故障(故障工况 3)下的过电压情况。

发生故障工况 3 时，ET 一次侧、二次侧的三相电压均变为 0，ET 二次侧返回到线路的电压减小，而 $Q_{E}$ 大幅增大、$I_{S}$ 和 $I_{v}$ 迅速增大。由式(5)可得

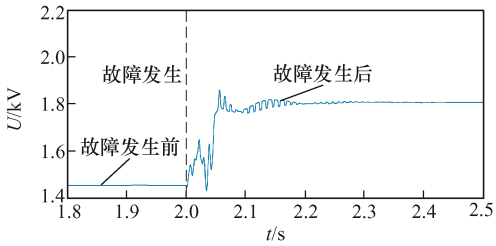
$$Q'_{v}=Q'_{E}-Q'_{S} \tag{9}$$

故 $Q_{v}$ 增大，VSC 交流母线出现过电压，而 ET 二次侧实际返回到线路的补偿电压减小。为跟踪系统功率变化，VSC 消耗的无功功率增多，造成严重的过电压现象。以 A 相为例，相关现象如图 5 所示；

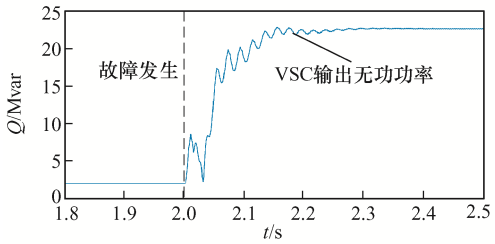
故障工况 2 与故障工况 3 类似，相关现象如图 6 所示。




(a) VSC交流母线A相电压



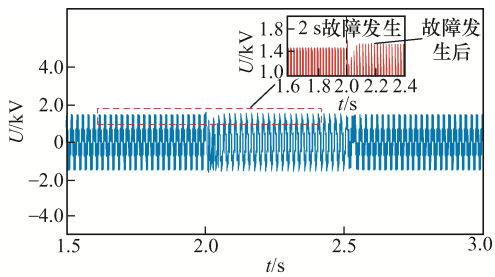

(b) VSC交流母线A相电压幅值变化



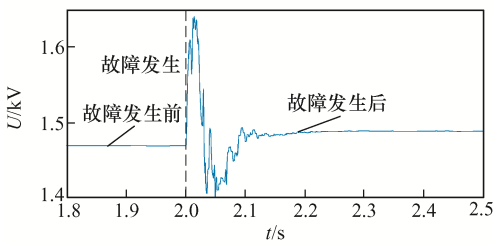

(c) 故障前、后VSC输出无功功率变化

**图 5 故障工况 3 下 A 相 VSC 交流母线电压及 VSC 输出无功功率变化**

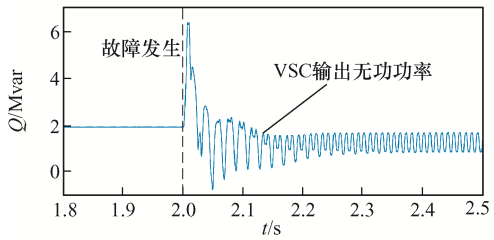
**Fig. 5 TChanges of phase-A VSC AC bus voltage and output reactive power under fault condition 3**




(a) VSC交流母线A相电压




(b) VSC交流母线A相电压幅值变化




(c) 故障前、后VSC输出无功功率变化

**图 6 故障工况 2 下 A 相 VSC 交流母线电压及 VSC 输出无功功率变化**

**Fig. 6 Changes of phase-A VSC AC bus voltage and output reactive power under fault condition 2**

当 ET 二次侧发生接地短路故障时，ET 二次侧充当接地端，导致 VSC 失去调节作用。VSC 交流母线处电压受 ET 影响，跟随 $U_{\mathrm{E1A}}$ 变化，出现严重的过电压现象；当换流器交流母线处发生接地短路时，与 PST 的 ET 二次侧存在电气连接，交流母线接地故障处作为 ET 二次侧接地端，换流器交流母线处电位受 $U_{\mathrm{E1A}}$ 的影响。因此仅靠换流器控制已无法解决这 2 类过电压问题，需要相关绝缘装置配合。

## 3 HPFC 过电压抑制策略及 A-LADRC 方法

### 3.1 HPFC 过电压抑制策略及设计方法

针对第 2 节中的过电压问题，本文从控制方面寻求抑制过电压的方法，结合第 2.2 节中的故障下过电压特性分析可知，相比于正常工况，过电压主要由换流器消耗的无功功率变化引起。针对不同的过电压水平，并结合其过电压特性分析可知，通过调节 VSC 消耗的无功功率可以抑制过电压。根据不同过电压水平确定VSC输出无功功率的参考值，该参考值可以随着过电压的变化而改变，调节 VSC 的无功功率输出，进而实现过电压抑制。通过自适应调节 VSC 无功功率，可以最大效率地限制过电压水平。

过电压抑制策略主要包括过电压水平判断、自适应调节无功功率输出及限幅环节。过电压抑制策略如图 7 所示，具体设计如下。

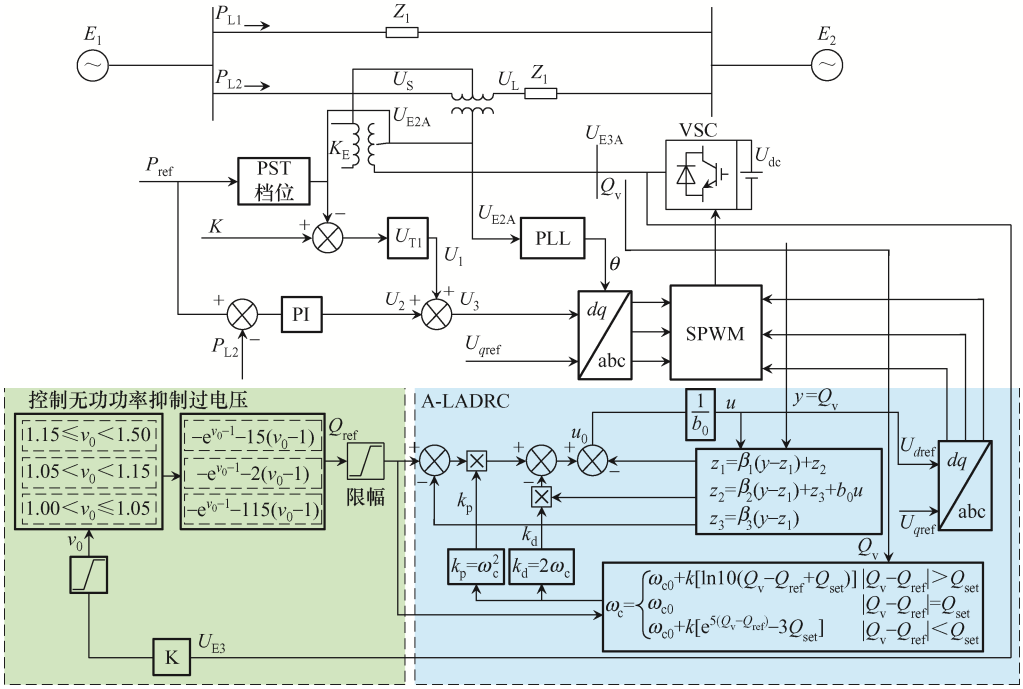



**图 7　加入无功功率控制后的 HPFC 整体控制策略**

**Fig. 7 HPFC integrated control strategy after adding reactive power control**

(1)过电压水平判断。

如图 7 所示，故障发生时，从 VSC 交流母线处获取电压信息(以正常工况下交流母线处电压为基准值，取标幺值)。为了保证控制策略的有效性，需要筛选有效的过电压信号进行限幅环节。选取过电压的范围为

$$1.00 < v_0 < 1.50 \tag{10}$$

式中，$v_0$ 为过电压，取标幺值。根据过电压水平，选择合适的信号通道输送到无功功率控制部分。

(2)自适应调节无功功率输出。

针对不同过电压水平数据可以得到输出无功功率与抑制过电压水平的对应关系为

$$Q_{\mathrm{ref}} = \begin{cases} -\mathrm{e}^{v_0-1} - 15(v_0-1) & 1.15 \leqslant v_0 < 1.50 \\ -\mathrm{e}^{v_0-1} - 2(v_0-1) & 1.05 < v_0 < 1.15 \\ -\mathrm{e}^{v_0-1} - 115(v_0-1) & 1.00 < v_0 \leqslant 1.05 \end{cases} \tag{11}$$

式中，$Q_{\mathrm{ref}}$ 为换流器输出无功功率参考值。根据过电压水平判断中获取的过电压水平，自适应生成合适的 $Q_{\mathrm{ref}}$，与 VSC 实际输出的无功功率经 PI 调节后，转换为电压参考信号，控制 VSC 输出无功功率跟踪设定的参考信号，从而抑制 VSC 交流母线过电压。

(3)限幅环节。

无功功率输出过大会造成反向过电压，为确保无功功率参考信号有效，需要限制其在合理范围内。限幅环节可以通过改变上、下限的大小，保证无功功率可以有效抑制过电压。

### 3.2 A-LADRC 方法

故障时利用 PI 调节方式控制无功功率输出，存在抑制过电压初始阶段因抑制速度慢导致的短时过电压现象，无法满足实际工程需求。为此，本文采用 LADRC，将线性扩张状态观测器 LESO (linear extended state observer)参数与其带宽相联系，并通过调节控制器带宽改变线性状态误差反馈 LSEF(linear state error feedback)控制 PD 组合的参数，提升抗扰性能和响应速度。此外，根据 VSC 输送无功功率反馈值，实现控制器带宽参数的自适应调节，提升过电压抑制速度并解决抑制初期的短时过电压问题，如图 7 所示。综上，具体 LESO 与 LSEF 控制参数设计如下。

(1)线性扩张状态观测器。

LESO 可以根据系统的输入和输出信息，实时

估计系统状态变量，对非线性系统具有良好的抗扰效果。二阶系统通常可表示为

$$\ddot{y}=-a_1\dot{y}-a_0y+b_0u \tag{12}$$

式中：$a_1$、$a_0$ 为控制参数；$b_0$ 为增益系数；$y$ 为系统输出量；$u$ 为系统输入量。

LESO 可表示为

$$\begin{cases}\dot{z}=[\boldsymbol{A}-\boldsymbol{LC}]z+[\boldsymbol{B},\boldsymbol{L}]\boldsymbol{u}_c\\ y_c=z\end{cases} \tag{13}$$

式中：$\boldsymbol{A}$、$\boldsymbol{B}$、$\boldsymbol{C}$ 为系数矩阵；$\boldsymbol{L}$ 为观测器误差反馈增益矩阵；$z$ 为观测器的状态变量；$\boldsymbol{u}_c$ 为观测器的组合输入，$\boldsymbol{u}_c=[u\ \ y]^{\mathrm{T}}$；$y_c$ 为观测器输出。结合极点配置法对观测器进行参数化处理，简化 LESO 设计，并利用观测器带宽调节观测器。取 $\boldsymbol{I}$ 为单位矩阵，令

$$\lambda(s)=\left|s\boldsymbol{I}-(\boldsymbol{A}-\boldsymbol{LC})\right|=(s+\omega_o)^3 \tag{14}$$

式中，$\omega_o$ 为观测器带宽。得到的 $\boldsymbol{L}$ 为

$$\boldsymbol{L}=[3\omega_o\ \ 3\omega_o\ \ \omega_o^3]^{\mathrm{T}} \tag{15}$$

(2)线性状态误差反馈控制。

针对本文 HPFC 系统，LSET 控制环可以表示为

$$u_0=k_p(R-z_1)-k_dz_2 \tag{16}$$

$$u=\frac{u_0-z_3}{b_0} \tag{17}$$

式中：$u_0$ 为 LSEF 控制环输出控制量；$k_p$、$k_d$ 为 HPFC 的增益系数；$R$ 为设定的系统输入值；$z_1$、$z_2$、$z_3$ 为 LESO 的状态变量。令 HPFC 的带宽为 $\omega_c$，将系统闭环极点配置于 $-\omega_c$ 处可得

$$s^2+k_ds+k_p=(s+\omega_c)^2 \tag{18}$$

对应的系数为

$$\begin{cases}k_p=\omega_c^2\\ k_d=2\omega_c\end{cases} \tag{19}$$

$\omega_c$ 与系统的响应速度密切相关，但仅靠给定数值不仅很难实现系统的快速精确调节，还可能存在响应速度过快或过慢的问题。

为了解决上述问题，本系统采用系统带宽自适应调节的方法，通过实时采集 VSC 输出无功功率与设定功率值之间的差值，并将该差值与功率设定值相比，自适应改变系统带宽，实现系统的精确、快速调节。由于抑制过电压时无功功率参考信号对应一个范围区间，故可以定义设定功率为 $Q_{\mathrm{set}}$，具体为

$$\omega_c=\begin{cases}\omega_{c0}+k[\ln 10(Q_v-Q_{\mathrm{ref}})+Q_{\mathrm{set}}] & |Q_v-Q_{\mathrm{ref}}|>Q_{\mathrm{set}}\\ \omega_{c0} & |Q_v-Q_{\mathrm{ref}}|=Q_{\mathrm{set}}\\ \omega_{c0}+k[\mathrm{e}^{5(Q_v-Q_{\mathrm{ref}})}-3Q_{\mathrm{set}}] & |Q_v-Q_{\mathrm{ref}}|<Q_{\mathrm{set}}\end{cases} \tag{20}$$

式中：$\omega_{c0}$ 为初始带宽；$k$ 为自适应调节系数。考虑到过电压与 $Q_v$ 在一定范围内，因此可以设定 $k$=5、$Q_{\mathrm{set}}$=4。当 $Q_v$ 与 $Q_{\mathrm{ref}}$ 之间的差值大于 $Q_{\mathrm{set}}$ 时，增大带宽，提升响应速度；当差值小于 $Q_{\mathrm{set}}$ 时，减小带宽，避免振荡。一般 $\omega_0$ 取 4~10 倍或 2~5 倍的 $\omega_0$。令 $\omega_{c0}$=500 p.u.时，过电压抑制效果最优。

## 4 实验验证

### 4.1 硬件在环测试平台

为验证本文所提出的过电压抑制策略及 A-LADRC方法的有效性，利用 RT-LAB(OP5600)搭建实时仿真平台进行验证。实验平台主要由 RT-LAB (0P5600)实时仿真器、上位机、录波仪组成，如图 8 所示。利用 MATLAB/Simulink 搭建仿真模型，由上位机将其拷入 RT-LAB 实时仿真器，经仿真器处理及 DL850 录波，完成数据处理后生成仿真波形。

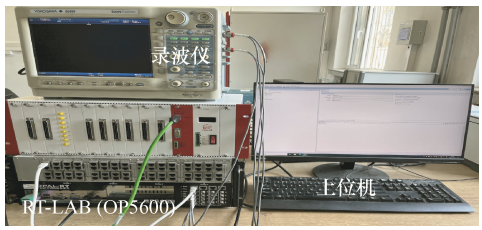



**图 8 RT-LAB 实时仿真平台实物图**

**Fig. 8 Physical photograph of RT-LAB real-time simulation platform**

为了能够直观、清楚地呈现所提抑制过电压策略的效果，将录波仪数据导出，并通过绘图软件将不同的实验波形绘制在同一坐标系中。HPFC 参数见表 1。

**表 1　HPFC 参数**

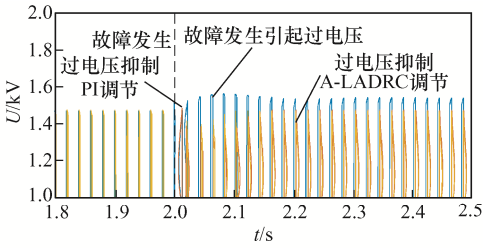
**Tab.1　The HPFC parameters**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 电源相位 $\delta_1$/(°) | 0 |
| 电源相位 $\delta_2$/(°) | −16 |
| ST 一次侧电压/kV | 220 |
| ST 二次侧电压/kV | 440 |
| ET 一次侧电压/kV | 220 |
| 直流电压/kV | 2.1 |
| VSC 连接阻抗/mH | 0.136 |

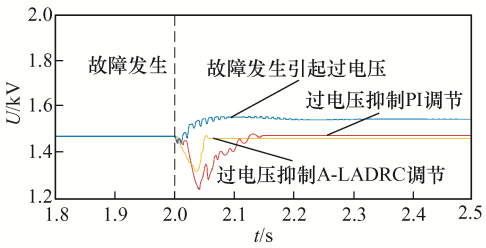
### 4.2　实验测试结果

在给定系统参数的前提下，分别验证故障工况 1、3 发生时，启动过电压抑制策略的效果。系统出现过电压时，根据过电压水平，自适应输出 VSC 输出无功功率参考信号。经限幅环节后，实时采集 $Q_v$，并将其与 $Q_{ref}$ 作差后与 $Q_{set}$ 相比，改变系统带宽大小、调节控制器参数，实现系统的精确、快速调节。以 A 相为例，将 PI 调节与 A-LADRC 在故障时 VSC 交流母线处过电压抑制效果及无功功率变化进行对比，具体调节波形如图 9、图 10 所示。

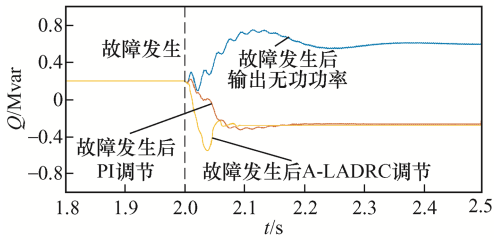
2.0~2.5 s 为故障时间，2.0 s 时启动过电压保护控制策略。针对故障工况 1，采用 PI 调节与 A-LADRC 时，过电压抑制达到稳定的输出时间分




(a) VSC交流母线电压不同调节方式下局部放大波形



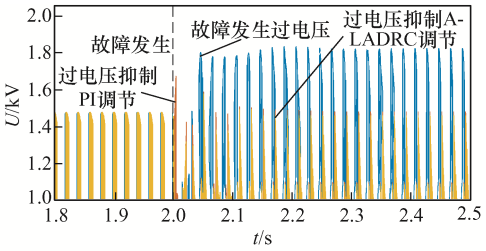

(b) VSC交流母线电压不同调节方式下幅值变化



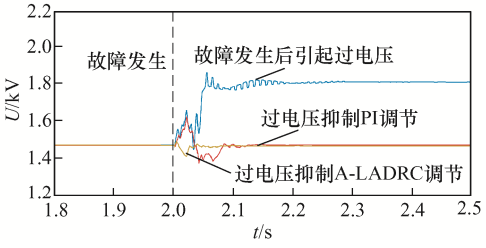

(c) 不同调节方式下VSC输出无功功率变化

**图 9　故障工况 1 过电压抑制传统 PI 调节与 A-LADRC 效果对比**

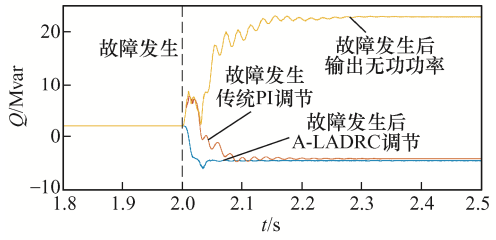
**Fig. 9 Overvoltage suppression effect comparison between traditional PI regulation and A-LADRC under fault condition 1**




(a) VSC交流母线电压不同调节方式下局部放大波形




(b) VSC交流母线电压不同调节方式下幅值变化




(c) 不同调节方式下VSC输出无功功率变化

**图 10　故障工况 3 过电压抑制传统 PI 调节与 A-LADRC 效果对比**

**Fig. 10 Overvoltage suppression effect comparison between traditional PI regulation and A-LADRC under fault condition 3**

别为 2.15 s 与 2.07 s，相关电压、功率变化如图 9 所示；针对故障工况 3，采用 PI 调节与 A-LADRC 时，过电压抑制达到稳定的输出时间分别为 2.30 s

与 2.07 s，具体波形如图 10 所示。

分析图 9、图 10 可知，采用自适应调节 VSC 无功功率输出可以有效抑制不同水平 VSC 的过电压。在过电压抑制初始阶段，PI 调节对控制参数要求较高，滞后效应明显，无法提供足够快的响应速度，并存在短时过电压现象。采用 A-LADRC 后，系统带宽参数自适应调节可以有效提升系统的响应速度，并降低参数设计难度，增强初始阶段抑制效果，有效解决过电压抑制初期存在的短时过电压问题，实现全过程过电压抑制。

通过仿真验证，进一步证明了自适应调节无功功率输出抑制过电压策略的有效性；同时，验证了控制环节中采用A-LADRC不仅具有较好的抑制效果，而且响应速度更优。

## 5 结论

本文提出一种结合无功功率自适应调节和 A-LADRC 控制的 HPFC 过电压抑制策略，用于抑制 HPFC 系统不同故障下导致的 VSC 过电压问题。在 HPFC 系统外部及内部故障情况下进行仿真，并与传统 PI 调节下过电压抑制效果进行对比，验证了本文所提过电压抑制策略及A-LADRC方法的有效性，得出结论如下。

(1)通过分析 HPFC 的工作过程及不同故障下的过电压发生机理，确定了 HPFC 产生过电压最严重的场景，并根据不同过电压水平自适应调节 VSC 无功功率输出，进而有效抑制不同故障下引起的过电压。

(2)针对过电压抑制初始阶段传统控制器调节速度慢引起的短时过电压情况，分析系统中控制器带宽参数与输出量之间的关系，根据 VSC 输出无功功率反馈值，自适应调制系统调节速度，实现在 0.07 s 内抑制处于 1.0 p.u.~1.5 p.u.水平的过电压，增强抑制效果。

(3)通过 RT-LAB 实时仿真器和 DSP 控制器进行实时仿真，验证了所提策略对不同故障引起的过电压抑制的有效性及初始阶段抑制效果的优越性，表明了该策略具有较好的实际工程应用价值。

**参考文献：**

[1] 杨用春, 杜翔宇, 杨鹏, 等. 混合潮流控制器阻抗特性分析及控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2024, 39(21): 6720-6733.
Yang Yongchun, Du Xiangyu, Yang Peng, et al. Analysis of impedance characteristics and control strategy of hybrid power flow controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(21): 6720-6733. (in Chinese)

[2] 韩旭东. 混合潮流控制器的参数设计与控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
Han Xudong. Parameter design and control strategy research of hybrid power flow controller [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)

[3] 陈柏超, 费雯丽, 田翠华, 等. 新型混合式统一潮流控制器及其调节特性分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(10): 3256-3264.
Chen Baichao, Fei Wenli, Tian Cuihua, et al. Novel hybrid unified power flow controller and regulation performance analysis [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(10): 3256-3264. (in Chinese)

[4] 杨用春, 杜翔宇, 李旭东, 等. 基于级联 H 桥的混合潮流控制器及控制策略研究[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2025, 52(4): 44-52.
Yang Yongchun, Du Xiangyu, Li Xudong, et al. Research on hybrid power flow controller and control strategy based on cascade H bridge [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2025, 52(4): 44-52. (in Chinese)

[5] 范越, 陈颖, 霍超, 等. 新能源场站过电压受变压器磁饱和影响机理分析及修正方法[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(5): 99-106.
Fan Yue, Chen Ying, Huo Chao, et al. Mechanism analysis and correction method for overvoltage of renewable energy station affected by transformer magnetic saturation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(5): 99-106. (in Chinese)

[6] 颜湘武, 郭燕, 彭维锋, 等. 基于旋转移相变压器的电

压源型无功补偿器及其控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(16): 4448-4464.
Yan Xiangwu, Guo Yan, Peng Weifeng, et al. Voltage source var compensator based on rotary phase shifting transformer and its control strategy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(16): 4448-4464. (in Chinese)

[7] 王烁哲, 韩民晓, 范溢文, 等. 基于改进自律分散控制的换流器型电网频率/电压调整与功率分配策略[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(13): 4980-4991, I0004.
Wang Shuozhe, Han Minxiao, Fan Yiwen, et al. Frequency/voltage regulation and power sharing strategy of converter-based grid with improved autonomous decentralized control [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2025, 45(13): 4980-4991, I0004. (in Chinese)

[8] 田安民, 孙光淼, 卢文兵, 等. 大容量变流器中 IGBT 关断过电压抑制技术研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(10): 13-16, 38.
Tian Anmin, Sun Guangmiao, Lu Wenbing, et al. Research on IGBT turn-off overvoltage suppression technology in large-capacity converter [J]. Power Electronics, 2023, 57 (10): 13-16, 38. (in Chinese)

[9] 邓超志. 基于 VSC-HVDC 的交直流混联供电系统内部过电压机理分析[J]. 机电信息, 2019(35): 9-11.
Deng Chaozhi. Analysis of internal overvoltage mechanism of AC-DC hybrid power supply system based on VSC-HVDC [J]. Mechanical and Electrical Information, 2019(35): 9-11. (in Chinese)

[10] 曹斌, 郑子萱, 刘鸿清, 等. 基于无功电流补偿的直驱风机故障后过电压抑制策略[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(9): 166-174.
Cao Bin, Zheng Zixuan, Liu Hongqing, et al. Post-fault overvoltage suppression strategy for direct-drive wind turbine based on reactive current compensation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(9): 166-174. (in Chinese)

[11] 赵东君, 郭春义, 叶全, 等. 抑制风电场经 LCC-HVDC 并网系统交流过电压的无功功率分散协同控制方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(1): 88-94.
Zhao Dongjun, Guo Chunyi, Ye Quan, et al. Reactive power decentralized cooperative control method for restraining AC overvoltage of wind farm via LCC-HVDC grid-connected system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 88-94. (in Chinese)

[12] 陈勇, 曹伟炜, 柏彬, 等. MMC-UPFC 单相接地故障下运行特性分析及整体保护策略设计[J]. 电工技术学报, 2019, 34(3): 599-610.
Chen Yong, Cao Weiwei, Bai Bin, et al. Operation characteristics analysis under single-phase grounding fault and overall protection scheme design of MMC-UPFC device [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(3): 599-610. (in Chinese)

[13] 张晓宇, 顾乔根, 文继锋, 等. 统一潮流控制器系统串联变压器保护设计[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 72-77, 112.
Zhang Xiaoyu, Gu Qiaogen, Wen Jifeng, et al. Series transformer protection design in inified power flow controller system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 72-77, 112. (in Chinese)

[14] 崔福博, 郭剑波, 荆平, 等. MMC-UPFC 接地设计及其站内故障特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1628-1636.
Cui Fubo, Guo Jianbo, Jing Ping, et al. The grounding design and internal fault characteristic of MMC-UPFC [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2015, 35(7): 1628-1636. (in Chinese)

[15] 董芷函, 王国腾, 徐政, 等. 白鹤滩−江苏特高压混合级联直流系统运行特性分析方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(6): 118-125.
Dong Zhihan, Wang Guoteng, Xu Zheng, et al. Operation characteristic analysis method of Baihetan-Jiangsu hybrid cascaded UHVDC system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(6): 118-125. (in Chinese)

[16] 丁汀. 基于 MMC 的统一潮流控制器的电磁暂态特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
Ding Ting. Research on the electromagnetic transient characteristics of modular multilevel based unified power flow controller [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019. (in Chinese)

[17] 陈彤阳. 新型混合潮流控制装置拓扑及控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
Chen Tongyang. Research on topology and control

strategy of new hybrid power flow control device [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)

[18] 高本锋, 王晓, 梁纪峰, 等. 混合型统一潮流控制器抑制风电次同步振荡控制策略[J]. 电力建设, 2021, 42(9): 53-64.
Gao Benfeng, Wang Xiao, Liang Jifeng, et al. Control strategy of hybrid unified power flow controller to suppress wind power sub-synchronous oscillation [J]. Electric Power Construction, 2021, 42(9): 53-64. (in Chinese)

[19] 万陆峰, 徐玉珍, 金涛. 基于模糊免疫-单神经元 PID 控制单开关高增益直流变换器[J]. 电源学报, 2024, 22(6): 13-24.
Wan Lufeng, Xu Yuzhen, Jin Tao. Single-switch high-gain DC-DC converter based on fuzzy immune-single neuron PID control [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 13-24. (in Chinese)

[20] 高志强. 自抗扰控制思想探究[J]. 控制理论与应用, 2013, 30(12): 1498-1510.
Gao Zhiqiang. On the foundation of active disturbance rejection control [J]. Control Theory & Applications, 2013, 30(12): 1498-1510. (in Chinese)

[21] 李志华, 曾江, 黄骏翅, 等. 基于线性自抗扰控制的微网逆变器时-频电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 145-154.
Li Zhihua, Zeng Jiang, Huang Junchi, et al. Time-frequency voltage control strategy of microgrid inverter based on linear active disturbance rejection control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 145-154. (in Chinese)

[22] Tan Wen, Fu Caifen. Linear active disturbance-rejection control: Analysis and tuning via IMC [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(4): 2350-2359.

[23] 孟建辉, 孙亚鑫, 张自力, 等. 带宽参数自适应调整的压缩空气储能线性自抗扰平滑并网控制策略[J]. 电源学报, 2026, 24(5): 120-130.
Meng Jianhui, Sun Yaxin, Zhang Zili, et al. Linear active disturbance Rejection smooth grid-connection control strategy for com-pressed air energy storage with adaptive adjustment of bandwidth parameters [J]. Journal of Power Supply, 2026, 24(5):120-130. (in Chinese)

[24] Zhou Xuesong, Zhong Weibao, Ma Youjie, et al. Control strategy research of D-STATCOM using active disturbance rejection control based on total disturbance error compensation [J]. IEEE Access, 2021, 9: 50138-50150.

[25] 李树鹏, 李振斌, 刘亚丽, 等. 支撑微电网和配电网灵活潮流调节的电流源型多端口互联变流器控制技术[J]. 电源学报. 2025, 23(4): 233-241.
Li Shupeng, Li Zhenbin, Liu Yali, et al. Multi-port interconnected current-source converter control technology supporting flexible power flow regulation in microgrids and distribution networks [J]. Journal of Power Supply. 2025, 23(4): 233-241. (in Chinese)

[26] 叶怡伟, 陈敏, 徐德鸿. 软开关有源钳位逆变器逐波限流控制策略研究[J]. 电源学报, 2024,22(6):43-50.
Ye Yiwei, Chen Min, Xu Dehong. Research on cycle-by-cycle current limit strategies for active-clamped soft-switching inverters [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(6): 43-50. (in Chinese).

[27] 李宗霖, 陈昊, 戚湧, 等. 基于自抗扰滑模控制的开关磁阻电机转矩分配控制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(18): 5639-5656.
Li Zonglin, Chen Hao, Qi Yong, et al. Torque sharing function control strategy for switched reluctance motor based on active disturbance rejection sliding mode control [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5639-5656. (in Chinese)



吴鹏

**作者简介：**

吴鹏(1987— )，男，硕士，副高级工程师。研究方向：输变电工程设计及新技术。E-mail：wupeng11@126.com。

赵彭辉(1995— )，男，硕士，工程师。研究方向：新能源并网发电技术，过电压绝缘与配合等。E-mail：jyy_zhaoph@126.com。

袁新成(2001— )，男，通信作者，硕士研究生。研究方向：新能源并网控制技术。E-mail：18678570769@163.com。

孟建辉(1987— )，男，博士，高级工程师。研究方向：电力电子技术，新能源发电与电力系统。E-mail：mengjianhui2008@163.com。

(责任编辑：孙美菊)