DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.173 **中图分类号**：TM726 **文献标志码**：A

面向潮流调控与电能质量治理的混合式柔性合环装置多模态控制策略研究

熊力颖[1]，杨泽斌[1](中国电源学会会员)，易 皓[1](中国电源学会会员)，
慕小斌[2]，徐玮韡[3]，宁 昕[4]
(1.西安交通大学电气工程学院，西安 710000；2.中国电力科学研究院有限公司，北京 100000；
3.国网浙江省电力有限公司电力科学研究院，杭州 310000；4.国家电网有限公司，北京 100000)

摘要：混合式柔性合环装置在调节精度、过载能力与经济性上综合了电力电子式与电磁式合环装置的优点，具备较强的工程适用性。针对混合式柔性合环装置在电网稳态互联下的潮流调控与背景谐波问题，以及失电转供下的负载电压偏差与谐波电压问题，分析2种工况下的线路潮流及谐波分布特性，提出相应的潮流调控与多模态电能质量治理策略，并通过仿真验证了策略的可行性。

关键词：新型电力系统；混合式柔性合环装置；潮流调控；电能质量治理

Research on Multi-mode Control Strategy for Hybrid Flexible Interconnection Device in Terms of Power Flow Control and Power Quality Management

XIONG Liying[1], YANG Zebin[1], *Member*, *CPSS*, YI Hao[1], *Member*, *CPSS*, MU Xiaobin[2],
XU Weiwei[3], NING Xin[4]
(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710000, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Beijing 100000, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310000, China; 4. State Grid Corporation of China, Beijing 100000, China)

Abstract: Hybrid flexible interconnection devices (FIDs) combine the advantages of power electronics technology and electromagnetic interconnection devices in terms of regulation accuracy, overload capacity and economy, which have been favored in engineering applications. Aimed at the problems of power flow control and background harmonics in a hybrid FID under the condition of steady-state interconnection of power grid, as well as the problem of load voltage deviation and harmonic voltage under the condition of power-loss switching, the line power flow and harmonic distribution characteristics under these two operating conditions are analyzed, and the corresponding power flow control and multi-mode power quality management strategies are put forward. In addition, the feasibility of the proposed strategies is verified by simulation results.

Keywords: Novel power system; hybrid flexible interconnection device (FID); power flow control; power quality management

收稿日期：2024-12-09；**修回日期**：2025-02-20，2025-03-24；
录用日期：2025-04-07；**网络首发日期**：2025-04-21
基金项目：国家电网公司总部科技资助项目(5400-202419190A-1-1-ZN)
This work is supported by State Grid Corporation of China Headquarters Technology Project under the grant 5400-202419190A-1-1-ZN

在构建安全高效、柔性灵活的新型电力系统趋势下[1-2]，配电网的灵活性直接影响电力系统的潮流互济和优质供电能力。长期以来，我国配电网以“闭环设计、开环运行”为主[3]的设计架构已无法应对当前紧迫的现实需求[4]。

面向供电质量提升与新能源高效消纳的双重

迫切需求，实现配电网的柔性合环运行被认为是解决上述问题的重要手段[5-7]。配电网柔性合环装置FID(flexible interconnection device)根据组成结构可分为电力电子式、电磁式和混合式三大类型。现有对电力电子式合环装置的研究大多集中在背靠背电压源型变流器 BTB-VSC(back-to-back voltage source converter)[8-9]和统一潮流控制器 UPFC(unified power flow controller)[10-11]。在电能质量治理方面，利用 UPFC 进行谐波和无功补偿得到了重点研究，文献[12]采用功率角控制方法，提出了 1 种基于数据驱动的控制器，实现了在不同补偿条件下的电能质量治理；文献[13]针对电压闪变、不平衡状态下的负载无功和电压补偿的问题，提出了 1 种基于同步参考系的功率角控制方法；文献[14]采用 *dq*0 谐波检测法，结合自抗扰控制器和扩张状态观测器，通过非线性反馈控制律对谐波进行补偿；文献[15]采用模型预测控制方法，实现 UPFC 的谐波补偿。然而，上述文献均侧重于谐波、无功等电能质量治理策略的研究，没有兼具潮流调控的需求。同时，在面向大容量潮流调控需求的中高压配电网场景下，电力电子设备容量和耐压耐流需求显著提高，其高昂的造价降低了工程适用性。

混合式潮流控制器 HPFC(hybrid power flow controller)在降低电力电子设备容量与成本的同时，提高了调节精度与过载能力。然而，现有对 HPFC 的研究大多集中在拓扑优化及稳态潮流控制策略上[16-19]，未充分挖掘其电能质量治理功能。在中高压配电网场景中，利用 HPFC 进行经济性潮流调控的同时，充分发挥其电能质量治理能力，对保证电网稳态互联和失电转供长时间尺度下的供电质量具有重要意义。

因此，本文提出了 1 种兼具潮流调控与电能质量治理的混合式柔性合环装置控制策略。分析了稳态互联和失电转供不同工况下的等效电路及谐波分布特性，在潮流调控策略基础上，进一步提出了网侧谐波电流、负载侧谐波电压及电压偏差治理策略，使 HPFC 在进行大功率潮流调控的同时实现了电能质量治理，通过仿真验证了控制策略的可行性。

1 混合式柔性合环装置工作原理

混合式柔性合环装置拓扑结构如图 1 所示[17]，由改进 Sen变压器 IST(improved Sen transformer)和 UPFC 组成，IST 的 2 组二次绕组(A1-B1-C1、A2-B2-C2)通过不同的投切方式输出串联侧补偿电压矢量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{ISTA}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{ISTB}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{ISTC}}$，与 UPFC 输出电压矢量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{UPFCA}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{UPFCB}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{UPFCC}}$ 合成总的串联补偿电压矢量 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{HPFCA}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{HPFCB}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{HPFCC}}$。图中：$\boldsymbol{U}_{1\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{U}_{1\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{U}_{1\mathrm{C}}$ 为馈线 1 的三相电压；$\boldsymbol{U}_{2\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{U}_{2\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{U}_{2\mathrm{C}}$ 为馈线 2 的三相电压；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{reA}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{reB}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{reC}}$ 为装置出口的三相电压。

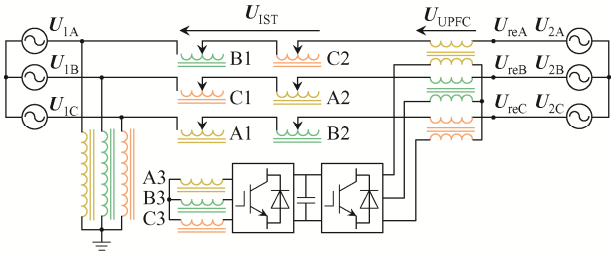


图 1 混合式柔性合环装置拓扑结构

Fig. 1 Topology of hybrid FID

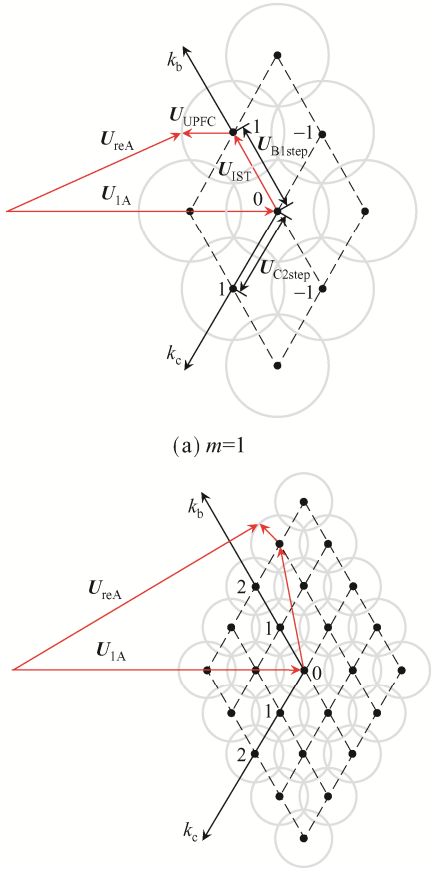
为保证线路的三相平衡，绕组 A1-B1-C1 的有载调压开关需要保持同样位置，绕组 A2-B2-C2 的有载调压开关需要保持同样位置，2 组绕组的有载调压开关位置可以不同。以 A 相为例，补偿后的系统首端电压表达式为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{reA}}=\boldsymbol{U}_{1\mathrm{A}}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{ISTA}}+\boldsymbol{U}_{\mathrm{UPFCA}} \tag{1}$$

A 相串联补偿电压通过 B 相与 C 相电压合成，B、C 相以此类推。以不同调节级数 $m=k$ $(0,\pm1,\cdots,\pm k)$ 为例，HPFC 输出电压向量和补偿后的系统首端电压向量图如图 2 所示。图中：k_{b}、k_{c} 分别为 B、C 相二次绕组投切位置；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{B1step}}$、$\boldsymbol{U}_{\mathrm{C2step}}$ 分别为 B、C 相二次绕组电压调节步长。

可见，IST 通过不同级数的向量组合可以得到不同的输出电压幅值和相位，当调节级数为 m 时，IST 可输出的电压向量个数为 $(2m+1)^2$。UPFC 输出电压覆盖的小圆范围弥补了 IST 离散调节的区

域，实现了电压的连续输出。



(a) m=1

(b) m=2

图 2　HPFC 输出电压向量与补偿后的首端电压向量

Fig. 2 HPFC output voltage vector and compensated head-end voltage vector

以 A 相为例，IST 的输出电压表达式为

$$\boldsymbol{U}_{\mathrm{ISTA}} = k_{\mathrm{b}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{B1step}} + k_{\mathrm{c}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{C2step}} \tag{2}$$

根据图 2 可得 UPFC 的最大输出电压有效值为

$$U_{\mathrm{UPFCmax}} = \frac{U_{\mathrm{step}}}{\sqrt{3}} = \frac{U_{\mathrm{SN}}}{\sqrt{3}m} \tag{3}$$

式中，U_{step} 为调节步长，$U_{\mathrm{step}} = \left|\boldsymbol{U}_{\mathrm{B1step}}\right| = \left|\boldsymbol{U}_{\mathrm{C2step}}\right| = U_{\mathrm{SN}} / m$；$U_{\mathrm{SN}}$ 为 IST 的二次绕组额定电压。

由于 IST 和 UPFC 串联侧流过的线路电流相同，因此可以得到 UPFC 和 IST 的容量比为

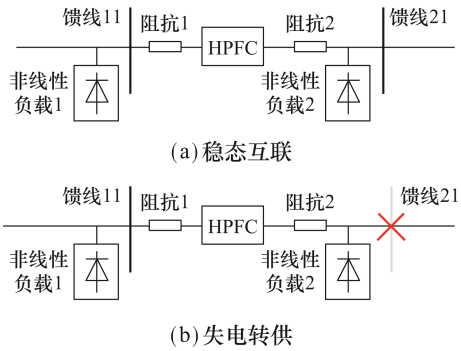
$$\frac{S_{\mathrm{UPFC}}}{S_{\mathrm{IST}}} = \frac{U_{\mathrm{UPFCmax}}}{\sqrt{3}U_{\mathrm{SN}}} = \frac{1}{3m} \tag{4}$$

可见，随着 IST 调节级数 m 的增大，UPFC 容量随之减小。UPFC 容量的减小有利于降低设备成本，但也缩小了电能质量治理范围，因此在实际的容量设计中需综合考虑成本和功能性。

2　稳态互联与失电转供下的电能质量问题分析

2.1　稳态互联与失电转供的系统场景

HPFC 在稳态互联与失电转供的系统接线如图 3 所示。稳态互联时，HPFC 用于馈线 11 和馈线 21 之间的潮流互济，同时非线性负载 1 产生的背景谐波会注入到馈线 11 中；馈线 21 发生失电故障时，非线性负载 2 作为谐波源使馈线 11 产生谐波，此外，馈线 11 通过长线路阻抗向远端非线性负载 2 供电，会导致负载产生电压偏差。



(a) 稳态互联

(b) 失电转供

图 3　稳态互联与失电转供的系统接线

Fig. 3 System wiring under conditions of steady-state interconnection and power-loss switching

根据上述分析可知，稳态互联时对 HPFC 的需求主要面向潮流调控与网侧谐波电流治理，失电转供时对 HPFC 的需求主要面向负载电压偏差与谐波电压的治理。

2.2　稳态互联与失电转供下的谐波分布特性

稳态互联与失电转供下的系统等效电路分别如图 4(a)和(b)所示。图中：$\boldsymbol{U}_{1\mathrm{h}}$、$\boldsymbol{U}_{2\mathrm{h}}$ 为互联馈线电压矢量；$\boldsymbol{Z}_{1\mathrm{h}}$、$\boldsymbol{Z}_{2\mathrm{h}}$ 为两侧馈线到 HPFC 的线路等效阻抗；$\boldsymbol{I}_{1\mathrm{h}}$ 和 $\boldsymbol{I}_{2\mathrm{h}}$ 为两端线路电流矢量；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{HPFCh}}$ 为 HPFC 串联侧输出电压矢量；$\boldsymbol{I}_{\mathrm{HPFCh}}$ 为 HPFC 并联侧输入电流矢量；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{Sh}}$ 为 HPFC 并联接入点电压矢量；$\boldsymbol{Z}_{\mathrm{Lh}}$ 和 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{Lh}}$ 分别为失电转供下的远端负载阻抗与负载电压矢量。

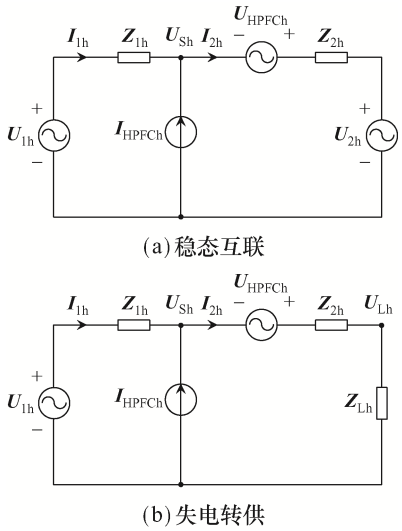


图 4 稳态互联与失电转供下的系统等效电路

Fig. 4 System equivalent circuits under conditions of steady-state interconnection and power-loss switching

稳态互联时，如图 4(a)所示，并联接入点 $\boldsymbol{U}_{Sh}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{U}_{Sh}=\frac{\boldsymbol{Z}_{2h}}{\boldsymbol{Z}_{1h}+\boldsymbol{Z}_{2h}}(\boldsymbol{U}_{1h}-\boldsymbol{I}_{HPFCh}\boldsymbol{Z}_{1h})-\frac{\boldsymbol{Z}_{1h}}{\boldsymbol{Z}_{1h}+\boldsymbol{Z}_{2h}}(\boldsymbol{U}_{HPFCh}-\boldsymbol{U}_{2h}) \tag{5}$$

为保证并联接入点的谐波电压最小，令 $\boldsymbol{U}_{Sh}=0$ 即可得到 HPFC 需补偿的谐波电流表达式为

$$\boldsymbol{I}_{HPFCh}=\frac{\boldsymbol{Z}_{2h}\boldsymbol{U}_{1h}-\boldsymbol{Z}_{1h}(\boldsymbol{U}_{HPFCh}-\boldsymbol{U}_{2h})}{\boldsymbol{Z}_{1h}\boldsymbol{Z}_{2h}} \tag{6}$$

失电转供时，如图 4(b)所示，转供电流会在线路阻抗上产生电压降，使远端负载产生电压偏差，其偏差量为

$$\Delta\boldsymbol{U}_{Lh}=\boldsymbol{U}_{1h}-\boldsymbol{U}_{Lh}=\boldsymbol{U}_{1h}-\frac{\boldsymbol{Z}_{Lh}(\boldsymbol{U}_{Sh}+\boldsymbol{U}_{HPFCh})}{\boldsymbol{Z}_{2h}+\boldsymbol{Z}_{1h}} \tag{7}$$

并联接入点 $\boldsymbol{U}_{Sh}$ 的表达式为

$$\boldsymbol{U}_{Sh}=\frac{\boldsymbol{U}_{1h}-\boldsymbol{Z}_{1h}\boldsymbol{U}_{HPFCh}+\boldsymbol{Z}_{1h}(\boldsymbol{Z}_{2h}+\boldsymbol{Z}_{Lh})\boldsymbol{I}_{HPFCh}}{\boldsymbol{Z}_{1h}+\boldsymbol{Z}_{2h}+\boldsymbol{Z}_{Lh}} \tag{8}$$

为使远端负载电压与电网 1 侧电压一致，将式(8)代入式(7)并令 $\Delta\boldsymbol{U}_{Lh}=0$ 可求得 HPFC 需补偿的串联输出电压为

$$\boldsymbol{U}_{HPFCh}=\boldsymbol{U}_{1h}\left(\frac{\boldsymbol{Z}_{1h}+\boldsymbol{Z}_{2h}+\boldsymbol{Z}_{Lh}}{\boldsymbol{Z}_{Lh}}-\frac{1}{\boldsymbol{Z}_{2h}+\boldsymbol{Z}_{Lh}}\right)-\boldsymbol{Z}_{1h}\boldsymbol{I}_{HPFCh} \tag{9}$$

为保证并联接入点的谐波电压最小，在式(8)令 $\boldsymbol{U}_{Sh}=0$ 即可得到 HPFC 需补偿的谐波电流表达式为

$$\boldsymbol{I}_{HPFCh}=\frac{\boldsymbol{Z}_{1h}\boldsymbol{U}_{HPFCh}-\boldsymbol{U}_{1h}}{\boldsymbol{Z}_{1h}(\boldsymbol{Z}_{2h}+\boldsymbol{Z}_{Lh})} \tag{10}$$

综上所述，稳态互联时控制 HPFC 输出并联补偿电流可实现网侧谐波电流的治理，失电转供时控制 HPFC 输出串联补偿电压可实现负载电压偏差与谐波电压的治理。式(6)、式(10)中含有参数 $\boldsymbol{U}_{HPFCh}$，因此 IST 绕组投切位置和 UPFC 输出电压会影响并联谐波电流补偿值，式(7)中含有参数 $\boldsymbol{I}_{HPFCh}$，因此谐波补偿电流也会影响串联谐波电压补偿值。

3 稳态互联下的潮流调控与谐波电流治理策略

3.1 潮流调控策略

根据图 4(a)的稳态互联系统等效电路可以得到 IST 接入后的线路潮流表达式为

$$P=\frac{U_S(X_2\cos\alpha-R_2\sin\alpha)(U_2\sin\alpha+U_{IST}\sin\theta_{IST})}{R_2^2+X_2^2}+\frac{U_2(R_2\cos\alpha+X_2\sin\alpha)(U_S-U_2\cos\alpha+U_{IST}\cos\theta_{IST})}{R_2^2+X_2^2} \tag{11}$$

$$Q=\frac{U_2(X_2\cos\alpha-R_2\sin\alpha)(U_S-U_2\cos\alpha+U_{IST}\cos\theta_{IST})}{R_2^2+X_2^2}-\frac{U_2(R_2\cos\alpha+X_2\sin\alpha)(U_2\sin\alpha+U_{IST}\sin\theta_{IST})}{R_2^2+X_2^2} \tag{12}$$

式中：P、Q 分别为互联馈线末端有功、无功功率；U_S 为装置并联接入点电压；X_2 为装置到馈线 2 的线路等效电抗；α 为两电网相位差；R_2 为装置到馈线 2 的线路等效电阻；U_2 为馈线 2 电压；U_{IST}、θ_{IST} 分别为 IST 输出电压有效值和相位。

根据接入装置前后的线路潮流表达式可得 HPFC 对线路的潮流调节量为

$$\Delta P=\frac{U_2U_{\mathrm{HPFC}}}{R_2^2+X_2^2}\cdot\left[X_2\cos(\alpha+\theta_{\mathrm{HPFC}})+R_2\sin(\alpha+\theta_{\mathrm{HPFC}})\right] \quad (13)$$

$$\Delta Q=\frac{U_2U_{\mathrm{HPFC}}}{R_2^2+X_2^2}\cdot\left[R_2\cos(\alpha+\theta_{\mathrm{HPFC}})-X_2\sin(\alpha+\theta_{\mathrm{HPFC}})\right] \quad (14)$$

式中，U_{HPFC}、θ_{HPFC}分别为 HPFC 输出电压有效值和相位，$\boldsymbol{U}_{\mathbf{HPFC}}=U_{\mathrm{HPFC}}\angle\theta_{\mathrm{HPFC}}$。

根据式(11)和式(12)即可求得 IST 所有输出电压向量对应的线路潮流，并定义潮流调控误差为

$$\varepsilon_S=\sqrt{(P_{\mathrm{ref}}-P)^2+(Q_{\mathrm{ref}}-Q)^2} \quad (15)$$

式中，P_{ref}、Q_{ref}分别为线路的有功、无功功率参考值。

稳态互联时，IST 进行大容量的离散潮流调控，UPFC 进行小容量潮流误差的补偿，进而实现有无功的独立连续调节。HPFC 的潮流控制策略如图 5 所示，图中：ωt 为对发送端电网 1 锁相输出的相位；ωL 为电流内环控制前馈解耦系数；U_{dcref}、U_{dc}分别为 UPFC 直流侧电压参考值与实际值；I_d、I_q分别为变流器电感电流 d、q 轴分量。S_d、S_q分别为调制波 d、q 轴分量；s_{a}、s_{b}、s_{c}分别为三相调制信号。

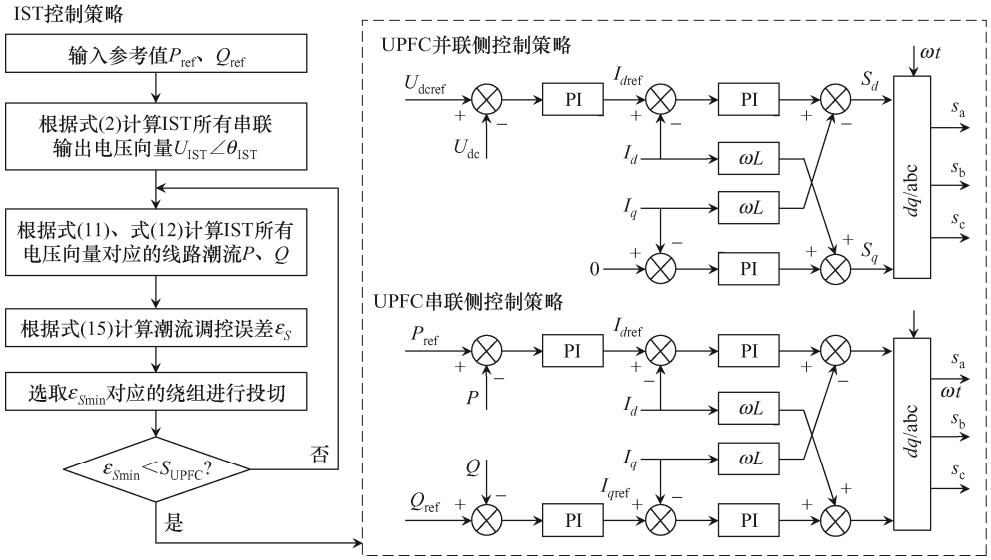


图 5　稳态互联下的 HPFC 潮流控制策略框图

Fig. 5 Block diagram of HPFC power flow control strategy under condition of steady-state interconnection

3.2 谐波电流治理策略

谐波电流治理控制策略如图 6 所示。其中，采样的网侧线路电流 i_{l} 通过坐标变换与低通滤波得到有、无功电流基波分量 i_{pf}、i_{qf}，再将其变换到三相坐标系下与线路电流作差即可得到线路谐波电流 $i_{\mathrm{lkh}}(k=\mathrm{a,b,c})$，经过系数 k 生成调制信号叠加到原有 UPFC 并联侧控制环路中，通过 k 即可调整谐波补偿强度。

包含基波和谐波的网侧谐波电流经过坐标变换后在 dq 坐标系下的表达式为

$$\begin{bmatrix}i_p\\ i_q\end{bmatrix}=\sqrt{3}\begin{bmatrix}\sum_{n=1}^{\infty}I_n\sin\left[(n\mp1)\omega t\mp\varphi_n\right]\\ \sum_{n=1}^{\infty}\pm I_n\cos\left[(1-n)\omega t-\varphi_n\right]\end{bmatrix} \quad (16)$$

式中：I_n 为基波和各次谐波电流有效值；n 为谐波次数；ω 为三相系统角频率；φ_n 为基波和各次谐波电流初始相位。

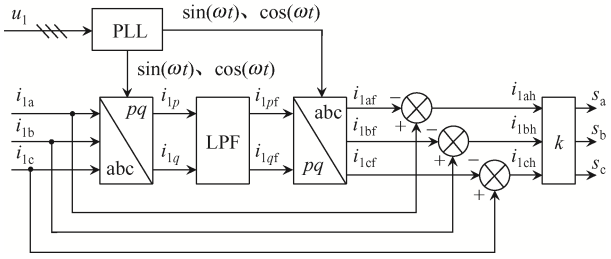


图 6　HPFC 网侧谐波电流治理控制框图

Fig. 6 Control block diagram of harmonic current control on grid-side of HPFC

式(16)经过低通滤波器后可得基波瞬时有功

和无功分量为

$$\begin{bmatrix} i_{pf} \\ i_{qf} \end{bmatrix} = \sqrt{3}\begin{bmatrix} -I_1 \sin\varphi_1 \\ I_1 \cos\varphi_1 \end{bmatrix} \tag{17}$$

将式(17)进行坐标变换即可得到网侧谐波电流的基波分量，与网侧电流采样值作差即可求得谐波电流分量。该控制策略计算简便，能够满足快速的动态响应需求。

当 UPFC 用于谐波治理时，其容量表达式为

$$S_{\mathrm{UPFC}}^2 = P_{\mathrm{UPFC}}^2 + Q_{\mathrm{fUPFC}}^2 + Q_{\mathrm{hUPFC}}^2 \tag{18}$$

式中：P_{UPFC} 为 UPFC 发出的有功功率；Q_{fUPFC} 为 UPFC 发出的无功功率基波分量；Q_{hUPFC} 为 UPFC 发出的无功功率谐波分量，其值大小表征了谐波补偿能力。

4 失电转供下的电压偏差与谐波电压治理策略

4.1 电压偏差治理策略

HPFC 的电压偏差治理原理向量如图 7 所示。图中：$\boldsymbol{U}_1$ 为网侧电压；$\boldsymbol{U}_{\mathrm{L}}$ 为负载电压；$\boldsymbol{Z}_1$、$\boldsymbol{Z}_2$ 分别为 HPFC 到网侧和负载的线路阻抗；$\boldsymbol{I}$ 为线路电流。当补偿电压 ΔU 在 UPFC 输出范围外时，首先通过 IST 输出与补偿电压误差量最小的电压向量，随后通过 UPFC 弥补误差量。

根据图 7 所示原理提出的 HPFC 电压偏差治理策略如图 8 所示。其中，IST 的电压调节误差定义为

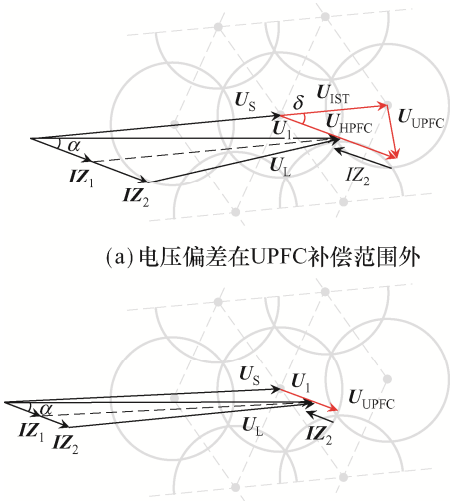
$$\varepsilon_U = \sqrt{\boldsymbol{U}_{\mathrm{HPFC}}^2 + \boldsymbol{U}_{\mathrm{IST}}^2 - 2\boldsymbol{U}_{\mathrm{HPFC}}\boldsymbol{U}_{\mathrm{IST}}\cos\delta} \tag{19}$$

式中，δ 为 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{IST}}$ 和 $\boldsymbol{U}_{\mathrm{UPFC}}$ 间的夹角。

上述方案利用 IST 实现大范围的电压偏差补偿和 UPFC 的小范围精细化补偿，在保证精度的同时拓宽了 UPFC 的电压偏差治理范围。

4.2 谐波电压治理策略

负载侧谐波电压治理策略如图 9 所示。在失电转供场景下，大功率转供电流经过长馈线线路阻抗会导致网侧更大的电压畸变。为保证锁相环的鲁棒性和快速跟踪能力，采用基于二阶广义积分器的锁相环 DSOGI-PLL(double second-order generalized integrator-phase locked loop)控制方案对电压基波正序分量进行锁相。



(a) 电压偏差在UPFC补偿范围外

(b) 电压偏差在UPFC补偿范围内

图 7 电压偏差治理原理向量

Fig. 7 Vectors under voltage deviation control principle

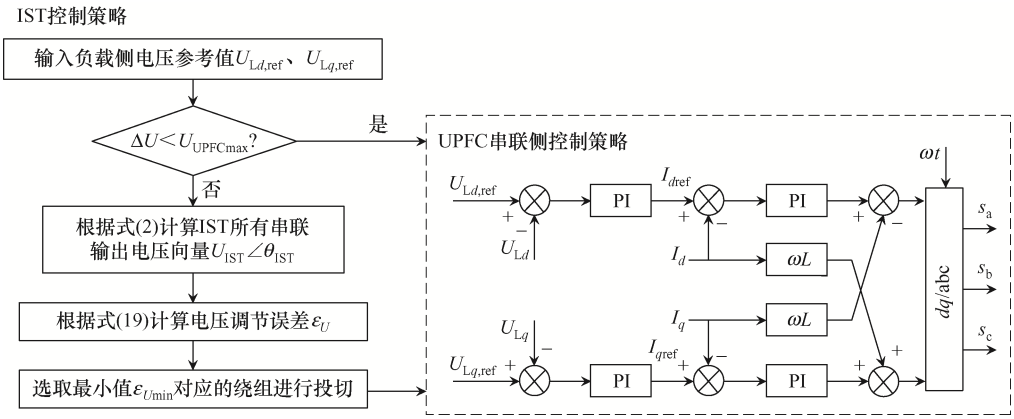


图 8 HPFC 电压偏差治理策略框图

Fig. 8 Block diagram of HPFC voltage deviation control strategy

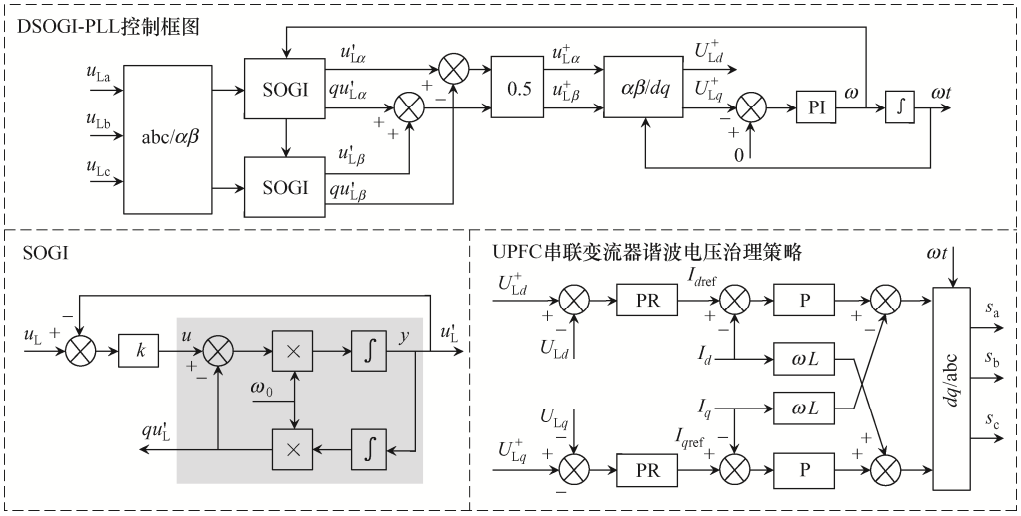


图 9　HPFC 负载侧谐波电压治理策略

Fig. 9 Harmonic voltage control strategy on load-side of HPFC

两相静止坐标系下的负载电压正序分量为

$$\begin{bmatrix} u_{\mathrm{L}\alpha}^{+} \\ u_{\mathrm{L}\beta}^{+} \end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} u_{\mathrm{L}\alpha} \\ u_{\mathrm{L}\beta} \end{bmatrix} \tag{20}$$

式中：$u_{\mathrm{L}\alpha}$、$u_{\mathrm{L}\beta}$ 分别为负载电压在两相静止坐标系下的 α、β 分量；$q = \mathrm{e}^{-\mathrm{j}\frac{\pi}{2}}$。

由式(20)可知，要提取出负载电压正序分量，需要对负载电压进行 90° 的相位偏移以获得两相正交电压信号。本文采用二阶广义积分 SOGI(second-order generalized integrator)方法产生两相正交信号，由图 9 可得其传递函数分别为

$$D(s) = \frac{u_{\mathrm{L}}'(s)}{u_{\mathrm{L}}(s)} = \frac{k\omega_0 s}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \tag{21}$$

$$Q(s) = \frac{qu_{\mathrm{L}}'(s)}{u_{\mathrm{L}}(s)} = \frac{k\omega_0^2}{s^2 + k\omega_0 s + \omega_0^2} \tag{22}$$

式中，ω_0 为谐振角频率。

由式(21)可知，$D(s)$ 实际上为带通滤波器，k 值越小，滤波效果越好，但会降低响应速度，综合两者选取 $k=\sqrt{2}$。若输入信号式角频率为 ω 的负载电压 u_{L}，则由式(21)和式(22)可以得出系统的幅相特性为

$$u_{\mathrm{L}}' = Du_{\mathrm{L}}\begin{cases} D^2 = \dfrac{(k\omega_0\omega)^2}{(k\omega_0\omega)^2 + (\omega^2 - \omega_0^2)^2} \\ \angle D = \arctan\left(\dfrac{\omega_0^2 - \omega^2}{k\omega_0\omega}\right) \end{cases} \tag{23}$$

$$qu_{\mathrm{L}}' = Qu_{\mathrm{L}}\begin{cases} Q^2 = \dfrac{\omega_0^2}{\omega^2}D^2 \\ \angle Q = \angle D - \dfrac{\pi}{2} \end{cases} \tag{24}$$

由式(23)和式(24)可知，稳态时 $\omega = \omega_0$，则 $D = Q = 1$，因此系统能对负载电压中频率为 ω_0 的分量进行无静差跟踪，且输出信号 u_{L}' 和 qu_{L}' 正交。通过 DSOGI-PLL 得到的基波正序 d、q 轴分量即为负载电压参考值，将负载电压参考值与实际值作差，经过多谐振频率的 PR 控制器生成电流内环的参考值，实现输出补偿电压对各次谐波指令的无静差跟踪。

5　仿真分析

为验证所提控制策略的可行性，根据图 3 所示的系统结构搭建了 Plecs 仿真模型，仿真参数见表 1。

稳态互联下的线路潮流调控波形如图 10 所示。从图 10(a)可以看出，线路功率能快速跟随指令突变，在 2 s 时刻线路有功功率从 13.0 MW 增加至 14.0 MW，无功功率从 2 Mvar 降低至 1 Mvar；4 s 时刻有功功率从 14.0 MW 降低至 13.5 MW，无功功率从 1 Mvar 降低至 0。从图 10(b)可以看出，系统首端电压和电流波形正弦化程度高，波形质量良

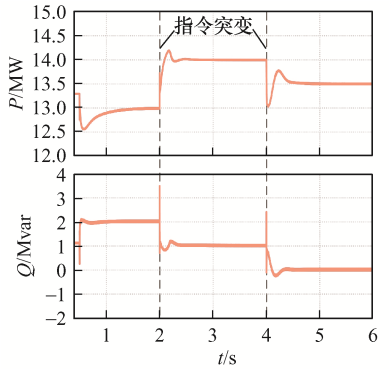
好。从图 10(c)可以看出，UPFC 直流侧电压在 2 s 和 4 s 时刻功率指令突变时，经过短暂的波动后能够稳定在 2 kV。

表 1 仿真参数

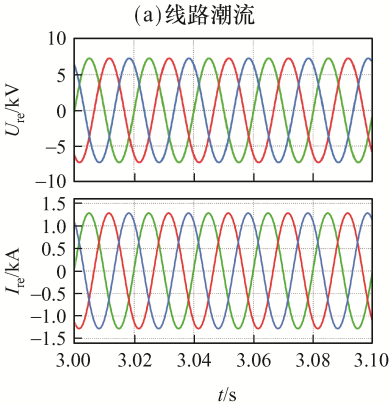
Tab. 1 Simulation parameters

项目	参数	数值
配电网(稳态互联模式)	电网 1、2	10 kV/50 Hz
	两电网相位差/(°)	30
	线路阻抗/Ω	0.3+j3
配电网(失电转供模式)	电网	10 kV/50 Hz
	负载/Ω	100
	线路阻抗/Ω	10+j10
HPFC 设备	IST 励磁绕组变比/kV	10/1
	IST 调节级数	2
	UPFC 滤波电容/μF	20
	UPFC 滤波电感/mH	1.2

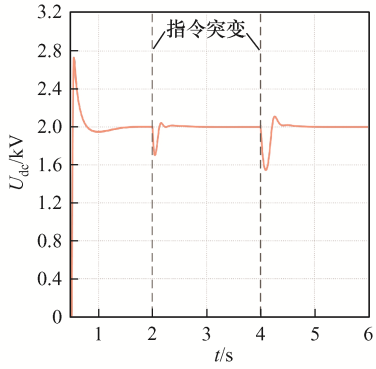
稳态互联下的网侧谐波电流治理前后对比如图 11 所示。可以看出，非线性负载作为谐波源产生谐波电流 I_L 使网侧电流 I_s 产生畸变，0.16 s 时刻投入网侧谐波电流治理策略，并联变流器输出谐波补偿电流 I_{sh}，经过短暂的谐波检测计算时间，I_s 的



(a)线路潮流



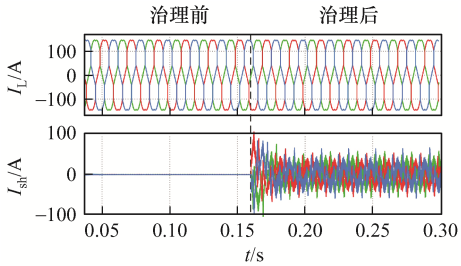
(b)系统首端电压电流



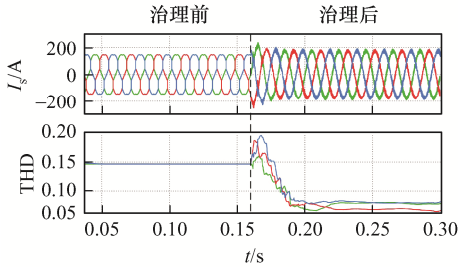
(c) UPFC直流侧电压

图 10 稳态互联下的潮流调控波形

Fig. 10 Waveforms of power flow regulation under condition of steady-state interconnection



(a)负载电流和并联变流器电流



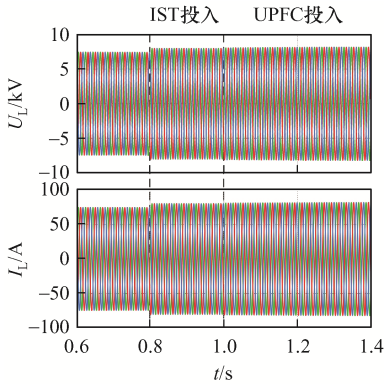
(b)网侧电流和THD

图 11 稳态互联下的网侧谐波电流治理前后对比

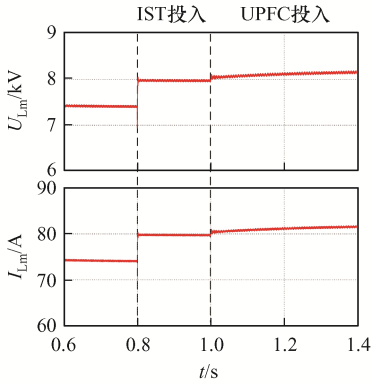
Fig. 11 Comparison before and after grid-side harmonic current control under condition of steady-state interconnection

THD 从 15%左右降低至 5%以下。

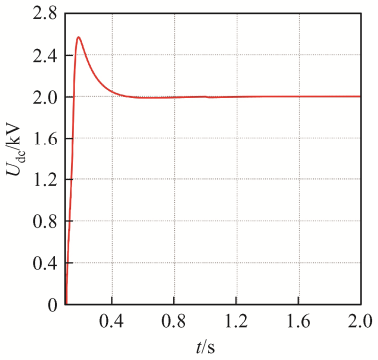
失电转供下的电压偏差治理波形如图12所示。其中，图 12(a)和(b)分别为负载电压电流及其对应的幅值，可见当一端电网发生失电故障后，负载相电压幅值仅为 7.4 kV 左右，不满足 10.0 kV 配电网电压等级要求；0.8 s 时刻投入电压偏差治理策略，HPFC 检测到电压偏差量在 UPFC 补偿范围外，因此首先通过 IST 输出补偿电压使负载相电压幅值增加到 8.0 kV 左右；1.0 s 时刻投入 UPFC 进行



(a) 负载电压电流



(b) 负载电压电流幅值



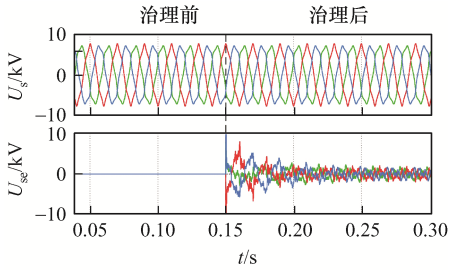
(c) UPFC直流侧电压

图 12　失电转供下的电压偏差治理波形

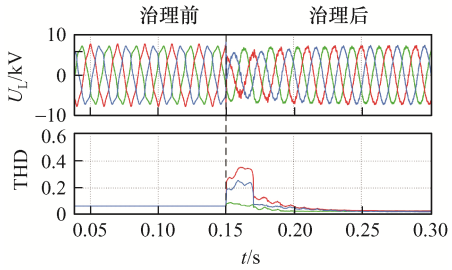
Fig. 12 Waveforms of voltage deviation control under condition of power-loss switching

误差量的弥补，最终使负载电压与网侧电压相等。从图12(c)可以看出，UPFC 直流侧电压能够稳定在2.0 kV。

失电转供下的负载谐波电压治理前后对比如图 13 所示。可以看出，网侧谐波电压源U_s使负载电压U_L产生畸变，0.15 s 时刻投入负载侧谐波电压治理策略，串联变流器输出谐波补偿电压U_{se}，使U_L的 THD 从 8%左右降低至 3%以下，满足公用电网谐波电压限值要求。



(a) 网侧电压和串联变流器电压



(b) 负载电压和THD

图 13　失电转供下的负载谐波电压治理前后对比

Fig. 13 Comparison before and after load harmonic voltage control under condition of power-loss switching

6　结语

本文以新型电力系统下配电网面临的潮流互济与供电质量挑战为背景，针对电网稳态互联下的潮流调控需求和网侧谐波电流与失电转供下的负载电压偏差与谐波电压问题，根据系统等效电路分析了线路潮流及谐波分布特性，进一步提出了基于混合式柔性合环装置的潮流调控及电能质量治理策略。仿真结果表明，混合式合环装置在稳态互联下能稳定进行线路的潮流调控与网侧谐波电流治理；在失电转供下，能进行负载侧电压偏差与谐波电压治理。

参考文献：

[1] 陈石明, 范烨, 刘晶. 智能电网内规模化分布式电池储能系统的调频控制方法[J]. 电源学报, 2025, 23(1): 120-131.

Chen Shiming, Fan Ye, Liu Jing. Frequency modulation control method for large-scale distributed battery energy storage systems in smart grid [J]. Journal of Power

Supply, 2025, 23(1): 120-131. (in Chinese)

[2] 张江, 刘谦, 李毓林, 等. 计及智能软开关的分布式电源优化配置研究[J/OL]. 电源学报, 1-12. (2023-06-13)[2024-12-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230612.1810.004.html.
Zhang Jiang, Liu Qian, Li Yulin, et al. Research on optimal configuration of distributed generation considering soft open point [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-12. (2023-06-13)[2024-12-06]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230612.1810.004.html. (in Chinese)

[3] 徐丙垠, 李天友, 薛永瑞. 智能配电网与配电自动化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 38-41.
Xu Bingyin, Li Tianyou, Xue Yongrui. Smart distribution grid and distribution automation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-41. (in Chinese)

[4] 王成山, 王丹, 周越. 智能配电系统架构分析及技术挑战[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 2-9.
Wang Chengshan, Wang Dan, Zhou Yue. Framework analysis and technical challenges to smart distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 2-9. (in Chinese)

[5] 周剑桥, 张建文, 施刚, 等. 应用于配电网柔性互联的变换器拓扑[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(1): 277-288, 342.
Zhou Jianqiao, Zhang Jianwen, Shi Gang, et al. Exploration on power converter topologies applied in flexible interconnection of distribution system [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 277-288, 342. (in Chinese)

[6] 李勇, 凌锋, 乔学博, 等. 基于网侧资源协调的自储能柔性互联配电系统日前-日内优化[J]. 电工技术学报, 2024, 39(3): 758-773.
Li Yong, Ling Feng, Qiao Xuebo, et al. Day-ahead and intra-day optimization of flexible interconnected distribution system with self-energy storage based on the grid-side resource coordination [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(3): 758-773. (in Chinese)

[7] 徐玉韬, 冯起辉, 谈竹奎, 等. 考虑转供与重构协同的多端柔性互联配电网供电恢复策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2696-2709.
Xu Yutao, Feng Qihui, Tan Zhukui, et al. Optimal power restoration strategy for multi-terminal flexible interconnected distribution networks based on flexible interconnection device and network reconfiguration [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2696-2709. (in Chinese)

[8] 李智诚, 吴建中, 和敬涵, 等. 软常开点的双闭环控制及其在配电网中的应用[J]. 智能电网, 2013, 1(1): 49-55.
Li Zhicheng, Wu Jianzhong, He Jinghan, et al. Dual closed-loop control of soft normally open points and its application in distribution networks [J]. Smart Grid, 2013, 1(1): 49-55. (in Chinese)

[9] Shi Tianjing, Zheng Huankun. Multi-time scale control strategy of distribution network based on SOP and energy storage [C]// 2018 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST). Seville, Spain, 2018: 1-6.

[10] Zhang Ke, Chen Zhijun, Wang Jun, et al. A fast-response power-flow control strategy of MMC-UPFC based on active disturbance rejection control [J]. IEEE Access, 2024, 12: 177553-177564.

[11] Afaq U, Ali F, Hasan A, et al. Non-linear synergetic control of UPFC for efficient damping of local and inter-area oscillations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 2106-2114.

[12] Ye Jian, Gooi H B, Wu Fengjiang. Optimization of the size of UPQC system based on data-driven control design [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2999-3008.

[13] Panda A K, Patnaik N. Management of reactive power sharing & power quality improvement with SRF-PAC based UPQC under unbalanced source voltage condition [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 84: 182-194.

[14] 程启明, 胡晓青, 吴凯, 等. 统一电能质量调节器的谐波检测与补偿策略研究[J]. 电测与仪表, 2012, 49(3): 19-23.
Cheng Qiming, Hu Xiaoqing, Wu Kai, et al. The research of harmonic detection and control strategy for unified power quality conditioner [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2012, 49(3): 19-23. (in Chinese)

[15] Kwan K H, Tan K T, So P L, et al. An unified power

quality conditioner for load sharing and power quality improvement [C]// 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Singapore, 2012: 963-967.

[16] Rashmi M C, Raghu C N. Review on hybrid power flow controllers in practical power systems [C]// 2023 Fourth International Conference on Smart Technologies in Computing, Electrical and Electronics (ICSTCEE). Bengaluru, India, 2023: 1-6.

[17] Rong Shiyang, Liang Jifeng, Li Xiaojun, et al. Research on HPFC coordination control strategy with PST and UPFC [C]// 2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED). Changsha, China, 2022: 1768-1773.

[18] 余梦泽, 李俭, 刘雷, 等. 电磁混合式统一潮流控制器的拓扑结构与控制策略优化[J]. 电工技术学报, 2015, 30(S2): 169-175.
Yu Mengze, Li Jian, Liu Lei, et al. Topology structure and control strategy optimization of electromagnetic hybrid unified power flow controller [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S2): 169-175. (in Chinese)

[19] 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)


熊力颖

作者简介：

熊力颖(2001—　)，男，硕士研究生。研究方向：柔性互联装置与技术。E-mail：Xiong_Liying@163.com。

杨泽斌(1995—　)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，助理教授。研究方向：电能质量治理技术，电能质量综合评估方法。E-mail：yangzbin@xjtu.edu.cn。

易皓(1984—　)，男，中国电源学会会员，博士，教授。研究方向：电能质量分析与控制，并网变流器建模与控制，柔性互联装置与技术。E-mail：yi_hao@xjtu.edu.cn。

慕小斌(1986—　)，男，博士，高级工程师。研究方向：柔性互联技术。E-mail：muxiaobin@geiri.sgcc.com.cn。

徐玮韡(1983—　)，女，硕士，高级工程师。研究方向：智能配用电技术。E-mail：vvvvei@126.com。

宁昕(1977—　)，男，硕士，教授级高工。研究方向：柔性互联技术，配电网运维检修。E-mail：xin-ning@163.com.cn。

(责任编辑：耿越)