DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.8.170 **中图分类号**：TM761 **文献标志码**：A

基于源网荷特性的油田配电网电能质量综合治理策略研究

张 凡[1]，顾沈卉[1]，崔田杰[2](中国电源学会学生会员)，赵泽玺[1]，
郭睿曦[2]，张 岩[2]
(1.长庆油田分公司清洁电力开发项目部，西安 710200；2.西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049)

摘要：油田配电网独特的源网荷特性使得电能质量问题突出。开展油田配电网电能质量评估和综合治理策略研究，通过对典型站所负荷的谐波特性进行监测及溯源分析，揭示出谐波源类型、特征及其分布，量化评估电能质量水平；进一步针对谐波源，提出采用有源和无源双层谐波治理方案，基于无功补偿设计无源滤波器，建立局域电网谐波优化补偿目标函数，通过几何形式简化计算，结合非线性规划算法寻求最优解，明确有源滤波装置在配电网中的最优布局点及配置容量。最后以IEEE 33节点算例验证了所提算法的有效性，并对油田配电网开展治理实验，以最小数量和容量的有源滤波器配置优化整体谐波，实现电压总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)从7.2%降低至2.1%，电流THD从44.5%降低至7.1%，证明所提方案的有效性。

关键词：油田配电网；电能质量；源网荷；谐波抑制

Comprehensive Governance Strategy for Power Quality of Oilfield Distribution Networks Based on Source-grid-load Characteristics

ZHANG Fan[1], GU Shenhui[1], CUI Tianjie[2], *Student Member, CPSS*, ZHAO Zexi[1],
GUO Ruixi[2], ZHANG Yan[2]
(1. Clean Power Development Project Department, Changqing Oilfield Company, Xi'an 710200, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The unique characteristics of source-grid-load in oilfield distribution networks make the power quality issues particularly prominent. The power quality assessment and comprehensive governance strategies for oilfield distribution networks are studied. By monitoring and tracing the harmonic characteristics of loads at a typical station, the types, features and distribution of harmonic sources are revealed, and the level of power quality is quantitatively assessed. Furthermore, aimed at the harmonic sources, a double-layer harmonic governance scheme using active and passive measures is proposed. Passive filters are designed based on reactive power compensation, and a harmonic optimization compensation objective function for the local power grid is established. Simplified geometric calculations combined with nonlinear programming algorithms are employed to find the optimal solution, thus determining the optimal placement and capacity of active filtering devices in the distribution network. Finally, the effectiveness of the proposed algorithm was validated using an IEEE 33-bus test system. In addition, governance experiments in oilfield distribution networks were carried out, and the overall harmonic performance was optimized with active filters of the minimal quantity and smallest capacity, reducing the voltage total harmonic distortion (THD) from 7.2% to 2.1% and current THD from 44.5% to 7.1%, thus proving the efficacy of

收稿日期：2024-04-29；**修回日期**：2024-06-13，2024-07-11；
录用日期：2024-07-18；**网络首发日期**：2025-01-03
基金项目：长庆油田公司科技资助项目(2024D4GY41)
This work is supported by Changqing Oilfield Company Technology Project under the grant 2024D4GY41

the proposed scheme.

Keywords: Oilfield power grid; power quality; source-grid-load; harmonic mitigation

油田配电网具有其特有的源网荷特性，采输油及注水等生产用电动机、电加热负荷及变频器等谐波源的叠加极易造成电网电能质量不达标，存在无功损耗大、设备损伤风险高的问题[1]。在清洁电力快速转型背景下，高比例分布式光伏发电渗透及配电网电力电子化的趋势，会进一步加重油田配电网谐波污染[2-3]。与谐波源少且相对集中的城市配电系统相比，油田场站分布广泛，使得谐波污染呈现广域化、分散化、全网化的特点[4]，针对广域分布的谐波源特性，油田配电网滤波器选址及容量优化配置必须综合考虑建设运行成本和治理成效，需要系统性的科学理论指导。

谐波治理策略主要分为无源、有源滤波 2 类[5]。无源滤波器由一定比例的电抗器和电容器串并联组合对特定次谐波进行抑制，其优化配置的研究集中于参数设计、运行方式等[6]。有源滤波器基于电力电子技术，具有效率高、功率密度高、控制性能好的优势，通过实时检测线路谐波电流，产生大小相等、相位相反的补偿量，研究集中在滤波器参数设计和控制算法等方面[7-10]，但相关谐波治理策略只适合分散治理场景，即对电网中某个较大的谐波源进行单独治理，就地进行谐波补偿。然而油田配电网和城市配电网不同，其复杂网络架构下谐波成分复杂且分布广泛，传统就近配置有源滤波器的方法只会过度增加投资和运维成本，治理效果有限且性价比低。集中补偿策略通过检测配电网中各个节点电压的总谐波畸变率 THD(total harmonic distortion)来设计整体谐波补偿方案，适合谐波分布广泛的场景。有学者进一步依据智能算法对全网节点统一进行谐波补偿[11]，但智能算法存在物理意义不明晰且易陷入局部最优解的不足。

本文通过实测油田某典型变电站进出线节点电压、电流数据，溯源分析电能质量状况，揭示出现有治理措施与负荷特性不适配；与传统有源、无源在同一点就近补偿的混合策略[12]不同，本文提出了双层补偿策略，在下层谐波源处增加成本较低的无源滤波器，滤除占谐波主要成分的 5 次谐波，同时针对有源滤波器提出了集中补偿方案，通过建立网络谐波分析模型，对谐波电压含有率 HRU(harmonic ratio of voltage)的目标函数进行分析得到几何模型，基于几何模型简化优化过程，在上层对有源滤波器安装数量、位置及容量进行优化设计，仅在少量节点增加有源滤波器，保障全网谐波满足国家标准要求。最后基于 IEEE 33 节点算例验证算法的有效性，并选择油田配电网典型线下网络进行谐波治理，谐波含量由 55%降低至 9%。

1　典型变电站电能质量现状

对油田配电网 23 座变电站的 296 条线路电能质量进行测量评估，测试项目包括电压幅值偏差、电压频率偏差、三相不平衡度、电压波动与闪变、三相功率、电压电流的谐波含量。电能质量不达标类型包括功率因数(101 条)和电流谐波含量(64 条)。

1.1　典型出线电流谐波统计

油田配电网电能质量问题突出的某变电站，其连接的区域电网谐波源类型齐全，谐波污染严重。实测 1#主变 35 kV 出线侧谐波超标严重，谐波电流达到国家标准要求 2 倍以上，对其下游出线和负载情况做溯源分析。通过对比实测谐波值及谐波允许值进行量化评估。谐波电流允许值的表达式为

$$I_h = \frac{S_{\mathrm{k}}}{S_{\mathrm{b}}} I_{h\mathrm{p}} \tag{1}$$

式中：I_h 为第 h 次谐波电流允许值；S_{k} 为公共连接点的最小短路容量；S_{b} 为基准短路容量；$I_{h\mathrm{p}}$ 为第 h 次谐波电流实测值。

1#主变有 311 线、312 线、313 线、314 线和 315 线共 5 回出线，测试过程中 312 线无负载运行，313 线电流谐波 THD 为 3.58%，其余出线谐波电流明显超标，见表 1，其中 THDi 为电流总谐波畸变率。314 线 5 次谐波超标(序号 3)，其余线路虽谐波有效值满足国家标准要求，但谐波含量较大，电流波形畸变较为严重，随着负荷增大，均面临超标风险。

表 1 1#主变 35 kV 出线谐波含量超标线路及其谐波特征

Tab. 1 Lines with excessive harmonic content of 35 kV outgoing line at No. 1 main transformer, and their harmonic characteristics

序号	出线名称	测试电流/A	最小短路容量/MVA	分项名称	3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波	13 次谐波	结论
1	1#主变35 kV 侧出线	150.3	116.906	实际测量 THDi/%	0.250	8.020	1.500	0.980	0.860	5 次超标
				实际测量谐波值/A	0.376	12.070	2.257	1.475	1.294	
				实际修正允许值/A	5.611	5.611	4.115	2.619	2.198	
2	35 kV 311 线	43.5	109.889	实际测量 THDi/%	1.150	9.070	2.320	3.500	1.940	未超标
				实际测量谐波值/A	0.500	3.945	1.000	1.523	0.844	
				实际修正允许值/A	5.274	5.274	3.868	2.461	2.066	
3	35 kV 314 线	69.9	78.300	实际测量 THDi/%	0.440	7.79	3.420	0.650	0.770	5 次超标
				实际测量谐波值/A	0.307	5.44	2.390	0.454	0.538	
				实际修正允许值/A	3.758	3.758	2.756	1.754	1.472	
4	35 kV 315 线	24.8	83.073	实际测量 THDi/%	3.290	10.170	3.780	3.450	1.090	未超标
				实际测量谐波值/A	0.407	1.261	0.469	0.428	0.135	
				实际修正允许值/A	3.987	3.987	2.924	1.861	1.562	

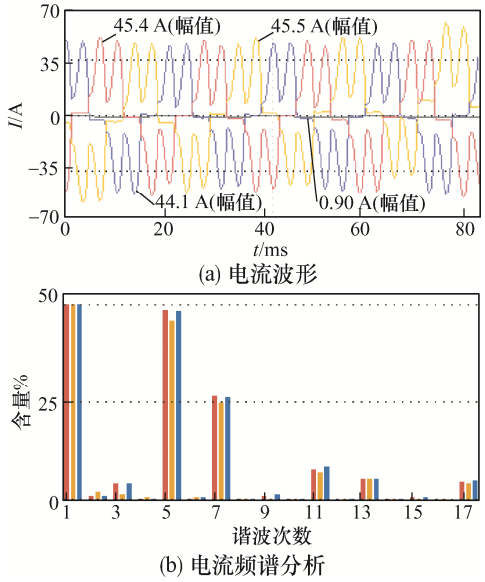
1.2 谐波溯源分析

油田配电网典型负荷包括电机类负荷、变频器、电加热设备等。当电机类负荷的铁心饱和时，在定子绕组中除了感应基波电势外，还产生谐波电势，通过改变三相绕组连接方式及采用短距与分布绕组等措施，将三倍次谐波和高次谐波的影响大幅度削弱，因此电机负荷一般只含 $6k\pm1(k=1, 2,\cdots)$次谐波。对于变频器类负荷，其输入侧的不控整流结构以断续的方式从电网吸收能量，脉动电压与电流叠加在线路上，导致线路上电压、电流波形畸变严重。

314 线主要接增压站、注水站和抽油机等电机类负荷，且配置大量变频器类负荷，电流波形如图 1 所示。其中电机类负荷主要包含 $6k\pm1(k=1, 2,\cdots)$ 次谐波，变频器产生较大低频谐波，谐波源叠加造成 314 线谐波超标，含有较大 5、7、11、13 次谐波成分。谐波电流含量过大会在变压器二次侧感应出较高的谐波电压，易造成关联设备损坏。

1.3 现有治理措施

目前油田配电网主要通过投切固定电容器进行功率因数校正，尚缺乏有效的谐波治理措施。谐波治理涉及多频率点的耦合及补偿，单纯无源补偿设备并不适配于油田配电网谐波治理，其主要原因在于：①谐波电流使电容器电流有效值增大，温升增高，局部过热降低其使用寿命甚至损坏电容器[13]；②电容器与线路阻抗易发生谐振，放大谐波电流，增大设备的电热应力，危及电网的安全运行；③响应速度与负荷运行周期不适配，无法做到快速的无功响应，大量低压电容器未投入工作，经济效益低。



(a) 电流波形

(b) 电流频谱分析

图 1 低压变频器输入电流波形和电流畸变率数据

Fig. 1 Input current waveforms and current THD data of low-voltage frequency converter

2 综合治理方案

为解决油田配电网谐波污染源广域分布的问

题，本文提出一种混合式双层谐波治理方案，下层治理方案为基于补偿节点无功的无源滤波器设计方案，上层治理方案为基于几何化的有源滤波器的优化配置。首先在油田配电网进行电能质量测量，获得电网谐波源的位置及主要成分，根据检测结果在各个谐波源处增加低成本的无源滤波器滤除主要谐波。上层有源滤波器对全网络的谐波情况进行优化，由于已经通过无源滤波器在谐波源处滤除了大量谐波，只需要在少量几个节点添加有源滤波器即可使全网谐波电压符合要求。无源滤波器的添加能有效减少有源滤波器的投入，降低投资成本，由于有源滤波器的存在，避免了加入大量无源滤波器改变系统阻抗、增加谐振风险，同时有源滤波器具有更好的灵活性，解决了无源滤波器在网络运行方式改变时无法实现谐波充分补偿的问题。

2.1 无源滤波器模型

无源滤波器运用谐振原理，选择合适参数的电抗器和电容器组合，实现对特定频率呈现低阻抗特性，从而使这一频率谐波电流流入该滤波支路，达到滤除谐波的目的。测量结果表明油田配电网内主要含 5 次谐波成分，因此设计单调谐滤波器对其进行就地滤除。

单调谐滤波器由电感L、电容C串联谐振构成，其阻抗表达式为

$$Z_{\mathrm{H}}=R_{\mathrm{H}}+\mathrm{j}\left(h\omega_1 L-\frac{1}{h\omega_1 C}\right) \tag{2}$$

式中：R_{H}为第 h 次单调谐滤波器电阻，H 表示第 h 次单调谐滤波器；ω_1 为基波频率。

当频率位于谐振点时，阻抗虚部为 0，其谐振次数为 h，特征阻抗 X_{o}及品质因数 q 分别为

$$\begin{cases} h=1/(\omega_1\sqrt{LC}) \\ X_{\mathrm{o}}=\sqrt{L/C} \\ q=X_{\mathrm{o}}/R_{\mathrm{f}h} \end{cases} \tag{3}$$

式中，R_{fh}为 h 次单调谐滤波支路的等效电阻。由于在单调谐滤波器的阻抗中 R_{H} 占比很小，在谐振点时，该谐波电流就会顺着这一低阻抗通道流入滤波器，从而使流入电网中的谐波变小，实现滤除 h 次谐波的目的。

2.2 无源滤波器优化设计

实测油田配电网中存在大量感性负载，导致线路功率因数偏低，因此设计单调谐滤波器在基波频率下的阻抗呈容性，所提供的容性无功功率可与系统中大量存在的感性无功相抵，以消除其不利影响。

确定滤波装置提供的基波无功容量为

$$Q_{\mathrm{c}}=\beta_{\mathrm{av}}P_{\mathrm{c}}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2) \tag{4}$$

式中：β_{av}为月平均负载率；P_{c}为月最大有功负载；φ_1为补偿前最大负荷时功率因数角；φ_2为补偿后功率因数角。

滤波支路中，由基波电流通过电路原理求解，进一步将式(3)中谐振关系代入可得基波电流有效值为

$$I_1=\frac{U_1}{1/(\omega_1 C)-\omega_1 L}=\frac{\omega_1 h^2 C U_1}{n^2-1} \tag{5}$$

式中：U_1为基波电压有效值；ω_1为基波角速度；n为谐波次数。

单调谐滤波器提供无功补偿容量Q_{fn}，按流过该次滤波器的谐波电流占总谐波电流的比例进行分配，可表示为

$$Q_{fn}=U_1 I_1=\frac{\omega_1 h^2 C U_1^{\,2}}{n^2-1}=Q_{\mathrm{c}}\frac{I_{fn}}{\sum_{n=2}^{\infty}I_{fn}} \tag{6}$$

式中，I_{fn}为流入 h 次单调谐滤波支路的谐波电流有效值。由式(6)结合式(3)可得滤波器参数，其中品质因数 q 通常取值为 40~60[14]，可同时保证损耗和滤波能力，其他的参数计算公式为

$$\begin{cases} C=Q_{fn}\dfrac{h^2-1}{\omega_1 U_1^{\,2}h^2} \\ L=\dfrac{1}{(h\omega_1)^2 C} \\ R=\dfrac{h\omega_1 L}{q} \end{cases} \tag{7}$$

2.3 有源滤波器选址优化设计

通过分析单节点有源滤波器对其余节点单次谐波电压的影响，得到该条件下配电网整体的谐波

优化效果。若电网节点 k(k=1, 2,⋯, m)含有非线性负载，谐波治理前该节点的 h 次谐波电压为

$$\boldsymbol{U}^{h}_{k,\text{before}}=U^{h,\text{r}}_{k,\text{brfore}}+\text{j}U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}} \tag{8}$$

式中：$U^{h,\text{r}}_{k,\text{brfore}}$ 为谐波治理前节点 k 的 h 次谐波电压的实部；$\text{j}U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}}$ 为谐波治理前节点 k 的 h 次谐波电压的虚部。

假设在任意节点 p 处安装一台有源滤波器，其输出电流可表示为

$$\boldsymbol{I}_p=\sum_{h=2}^{H}(I^{h,\text{r}}_p+\text{j}I^{h,\text{j}}_p) \tag{9}$$

式中：$I^{h,\text{r}}_p$ 和 $\text{j}I^{h,\text{j}}_p$ 分别为有源滤波器向电网注入谐波电流的实部和虚部；H 为最高谐波治理次数。

为保证每个治理点谐波畸变率满足国家标准要求，单次谐波含有率和 THD 的约束分别为

$$\begin{cases}\dfrac{\left|U^{h}_{k,\text{after}}\right|}{\left|U^{1}_{k,\text{after}}\right|}=H^{h}_{\text{HRU},k} & H^{h}_{\text{HRU},k}\leqslant\alpha\\[2ex] \dfrac{\sqrt{\sum_{h=2}^{H}\left|U^{h}_{k,\text{after}}\right|^2}}{\left|U^{1}_{k,\text{after}}\right|}=T_{\text{THD},k} & T_{\text{THD},k}\leqslant\beta\end{cases} \tag{10}$$

式中：$U^{h}_{k,\text{after}}$ 为谐波治理后节点 k 的 h 次谐波电压；$U^{1}_{k,\text{after}}$ 为谐波治理后节点 k 的基波电压；$H^{h}_{\text{HRU},k}$ 为治理后节点 k 的 h 次谐波畸变率；$T_{\text{THD},k}$ 为节点 k 的电压 THD；α 和 β 为由电压等级决定的系数。

在节点 p 滤波器对节点 k 的 h 次谐波电压的补偿量，等于其输出的 h 次谐波电流与节点 k 与 p 间阻抗的乘积，治理后节点 k 的 h 次谐波畸变率为

$$H^{h}_{\text{HRU},k}=\frac{1}{U^{1}_{k}}\left|U^{h,\text{r}}_{k,\text{before}}+(Z^{h,\text{r}}_{k,p}I^{h,\text{r}}_p-Z^{h,\text{j}}_{k,p}I^{h,\text{j}}_p)+\text{j}[U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}}+(Z^{h,\text{r}}_{k,p}I^{h,\text{j}}_p+Z^{h,\text{j}}_{k,p}I^{h,\text{r}}_p)]\right| \tag{11}$$

式中：U^{1}_{k} 为节点 k 的基波电压；$Z^{h,\text{r}}_{k,p}$ 和 $\text{j}Z^{h,\text{j}}_{k,p}$ 为配电网中目标节点 k 与安装节点 p 之间阻抗的实部和虚部。

通过对式(11)求平方，取绝对值符号可得 h 次谐波的优化目标函数为

$$g_k(I^{h,\text{r}}_p,I^{h,\text{j}}_p)=\frac{1}{\left|U^{1}_{k}\right|^2}\{A^{h}_{k}+B^{h,\text{r}}_{k,p}I^{h,\text{r}}_p+C^{h}_{k,p}I^{h,\text{j}}_p+D^{h}_{k,p}[(I^{h,\text{r}}_p)^2+(I^{h,\text{j}}_p)^2]\}\leqslant\alpha^2 \tag{12}$$

式中：$A^{h}_{k}=(U^{h,\text{r}}_{k,\text{before}})^2+(U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}})^2$；$B^{h,\text{r}}_{k,p}=2(U^{h,\text{r}}_{k,\text{before}}\cdot Z^{h,\text{r}}_{k,p}+U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{r}}_{k,p})$；$C^{h}_{k,p}=2(U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{r}}_{k,p}-U^{h,\text{r}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{j}}_{k,p})$；$D^{h}_{k,p}=(Z^{h,\text{r}}_{k,p})^2+(Z^{h,\text{j}}_{k,p})^2$。

式(12)的数学形式类似于圆形的函数表达式，可以进一步变形为

$$(I^{h,\text{r}}_p+X)^2+(I^{h,\text{j}}_p+Y)^2\leqslant R^2 \tag{13}$$

式中：$X=\dfrac{U^{h,\text{r}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{r}}_{k,p}+U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{j}}_{k,p}}{(Z^{h,\text{r}}_{k,p})^2+(Z^{h,\text{j}}_{k,p})^2}$；$R^2=\dfrac{(\alpha\left|U^{1}\right|)^2}{(Z^{h,\text{r}}_{k,p})^2+(Z^{h,\text{j}}_{k,p})^2}$；$Y=\dfrac{U^{h,\text{j}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{r}}_{k,p}-U^{h,\text{r}}_{k,\text{before}}Z^{h,\text{j}}_{k,p}}{(Z^{h,r}_{k,q})^2+(Z^{h,\text{j}}_{k,p})^2}$；$U^{1}$ 为节点 k 的基波电压有效值。绘制几何示意图如图 2 所示，如果 p 点补偿电流在 k 点的目标函数圆内，则可以使 k 点的电能质量满足国家标准要求。

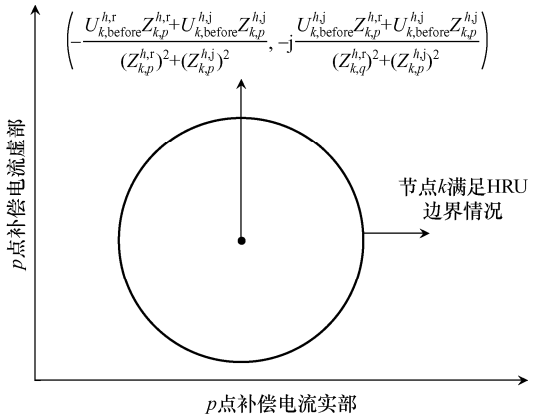


图 2 目标函数几何形式

Fig. 2 Geometric form of objective function

对于有 N 个节点的电网，在任意一点增加有源滤波器会产生 N 个圆，考虑在含有大量非线性负载的油田配电网中，单台设备可能无法保证所有节点满足标准要求，即无法满足一个补偿电流同时位于 N 个圆的内部。因此优先选择令各节点谐波电压畸变局部最小的候选节点，即在该点增加有源滤波器时 N 个圆心最集中。定义所有 N 个节点补偿电流圆心距离之和为治理系数，反映圆心的集中程度，表达式为

$$\delta_p=\sum_{h=2}^{H}P_h\left[\sum_{k=1}^{K}(I^{h,\text{r}}_{p,p}-I^{h,\text{r}}_{k,p})^2+\sum_{k=1}^{K}(I^{h,\text{i}}_{p,p}-I^{h,\text{j}}_{k,p})^2\right] \tag{14}$$

式中：$I_{p,p}^{h,\mathrm{r}}$，$I_{p,p}^{h,\mathrm{j}}$ 分别为 p 点加装滤波器对 p 点补偿的圆心横坐标和纵坐标，$I_{p,p}^{h,\mathrm{r}}=(U_{p,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{r}}Z_{p,p}^{h,\mathrm{r}}+U_{p,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{j}}Z_{p,p}^{h,\mathrm{j}})/[(Z_{p,p}^{h,\mathrm{r}})^2+(Z_{p,p}^{h,\mathrm{j}})^2]$，$I_{p,p}^{h,\mathrm{i}}=(U_{p,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{j}}Z_{p,p}^{h,\mathrm{r}}-U_{p,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{r}}Z_{p,p}^{h,\mathrm{j}})/[(Z_{p,p}^{h,\mathrm{r}})^2+(Z_{p,p}^{h,\mathrm{j}})^2]$；$I_{k,p}^{h,\mathrm{r}}$，$I_{k,p}^{h,\mathrm{j}}$ 分别为 p 点加装滤波器对 k 点补偿的圆心横坐标和纵坐标，$I_{k,p}^{h,\mathrm{r}}=(U_{k,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{r}}Z_{k,p}^{h,\mathrm{r}}+U_{k,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{j}}Z_{k,p}^{h,\mathrm{j}})/[(Z_{k,p}^{h,\mathrm{r}})^2+(Z_{k,p}^{h,\mathrm{j}})^2]$，$I_{k,p}^{h,\mathrm{j}}=(U_{k,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{j}}Z_{k,p}^{h,\mathrm{r}}-U_{k,\mathrm{before}}^{h,\mathrm{r}}Z_{k,p}^{h,\mathrm{j}})/[(Z_{k,p}^{h,\mathrm{r}})^2+(Z_{k,p}^{h,\mathrm{j}})^2]$；$P_h$ 为 h 次谐波的谐波系数，由该次谐波占总谐波的比例决定。

在该点增加一台有源滤波器，容量由下文容量优化设计得到。然后更新治理后网络中各节点的谐波信息，此时 N 个圆的分布情况会更加集中，通过对上述过程进行迭代，直到满足 N 个圆出现公共区域。

2.4 有源滤波器容量优化设计

确定治理设备最优安装位置后，所有节点的目标函数圆可能不存在公共区域，需增加有源滤波器改善目标函数圆分布情况，本部分计算增加的有源滤波器的补偿电流。首先仅考虑单次谐波抑制，输出电流的最小值首先应该满足一阶必要条件，即一阶导数为 0。对 2.3 节提出的优化目标函数式(12)求偏导，计算导数为 0 时补偿电流的大小，即

$$\begin{cases}\dfrac{\partial g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})}{\partial I_p^{h,\mathrm{r}}}=B_{k,p}^{h,\mathrm{r}}+2D_{k,p}^{h}I_p^{h,\mathrm{r}}=0\\ \dfrac{\partial g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})}{\partial I_p^{h,\mathrm{j}}}=C_{k,p}^{h}+2D_{k,p}^{h}I_p^{h,\mathrm{j}}=0\end{cases}\tag{15}$$

求解得

$$\begin{cases}I_p^{h,\mathrm{r}}=-B_{k,p}^{h,\mathrm{r}}/(2D_{k,p}^{h})\\ I_p^{h,\mathrm{j}}=-C_{k,p}^{h}/(2D_{k,p}^{h})\end{cases}\tag{16}$$

满足一阶必要条件不一定是最小值，仅当问题是凸优化问题时，满足一阶必要条件的解为真解，通过海森矩阵判断优化函数是否为凸优化。目标函数由二阶偏导数构成的海森矩阵为

$$\boldsymbol{H}=\begin{bmatrix}\dfrac{\partial^2 g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})}{\partial(I_p^{h,\mathrm{r}})^2} & \dfrac{\partial^2 g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})}{\partial I_p^{h,\mathrm{r}}\partial I_p^{h,\mathrm{j}}}\\ \dfrac{\partial^2 g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})}{\partial I_p^{h,\mathrm{r}}\partial I_p^{h,\mathrm{i}}} & \dfrac{\partial^2 g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})}{\partial(I_p^{h,\mathrm{i}})^2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}2D_{k,p}^{h} & 0\\ 0 & 2D_{k,p}^{h}\end{bmatrix}\tag{17}$$

如式(17)所示，其中 $D_{k,p}^{h}=(Z_{k,p}^{h,\mathrm{r}})^2+(Z_{k,p}^{h,\mathrm{j}})^2>0$，矩阵的所有元素均为正数，海森矩阵为正定矩阵，表示函数在所有自变量方向上都是凸函数，证明函数在导数为 0 点是 1 个全局最小值，即式(16)所求为全局最小值。

进一步考虑实际应用中受到接入点的容量限制、现场占地面积约束等，局域网络内各节点多次谐波抑制的补偿电流最优配置问题实质上是一个含有约束的极值问题，可以采用拉格朗日乘数法进行求解。拉格朗日法优点在于算法较为简单，在凸优化问题中具有良好的性能。在实际电力运行过程中，需要对有源滤波器的输出电流时刻进行优化，需要能够快速求解的算法。

对接入点的限制简化为有源滤波器的总容量存在上限，其相应约束条件为

$$\sum_{h=2}^{H}\left|I_p^{h,\mathrm{r}}+I_p^{h,\mathrm{j}}\right|\le\left|I_{\max}\right|\tag{18}$$

式中，$I_{\max}$ 为有源滤波器接入点允许输出的最大谐波电流总幅值上限。

结合约束条件，将原有优化问题式(15)表示为拉格朗日函数，即

$$L[I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}},\mu]=\sum_{h=2}^{H}\sum_{k=1}^{K}g_k(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})+\mu f(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})\tag{19}$$

式中：$f(I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}})=\sum_{h=2}^{H}[(I_p^{h,\mathrm{r}})^2+(I_p^{h,\mathrm{j}})^2]-I_{\max}^2$。此外，所求补偿电流容量的求解表达式为

$$\begin{cases}\dfrac{\partial L[I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}},\mu]}{\partial I_p^{h,\mathrm{j}}}=0\\ \dfrac{\partial L[I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}},\mu]}{\partial I_p^{h,\mathrm{r}}}=0\\ \dfrac{\partial L[I_p^{h,\mathrm{r}},I_p^{h,\mathrm{j}},\mu]}{\partial \mu}=0\end{cases}\tag{20}$$

油田配电网多节点电压谐波优化补偿算法的流程如图 3 所示，具体步骤如下。

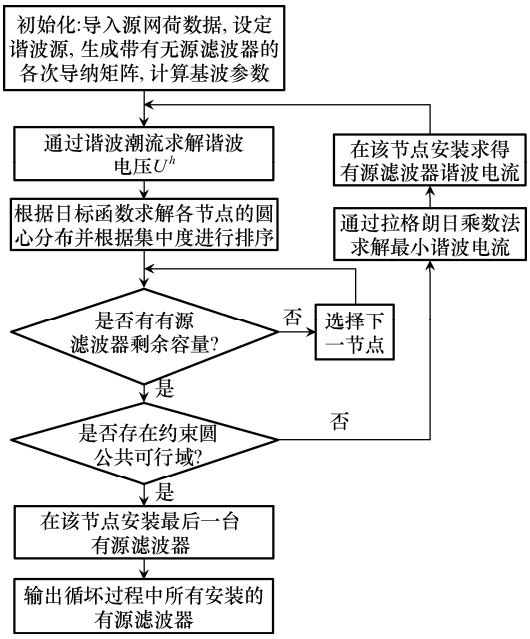


图 3 配电网混合式双层谐波治理方案流程

Fig. 3 Flow chart of hybrid double-layer harmonic mitigation scheme for distribution networks

步骤 1 初始化参数，包括网络节点参数，网络架构及阻抗，电网内谐波源位置、大小，以及各节点有源滤波器最大允许安装容量，建立电网谐波阻抗模型(包括无源滤波器)，形成各次的导纳矩阵。

步骤 2 进行基波及谐波潮流计算，获得谐波电压信息，用于目标函数的计算。

步骤 3 对所有节点进行目标函数圆的圆心分布计算，根据圆心集中程度对节点进行排序，依次对排序后的候选节点进行检验，判断其是否超过有源滤波器的安装容量上限，选择第一个具有安装容量的候选节点作为最优安装节点。

步骤 4 对最优安装节点进行圆心分布的计算，判断其补偿电流是否能够同时在所有节点的补偿圆内。如果存在，则在该点增加补偿电流相同大小的有源滤波器，使得所有节点的谐波满足要求，有源滤波的优化配置结束，输出所有循环过程中加装的有源滤波器；如果不存在，则进入步骤 5，继续进行谐波优化。

步骤 5 通过拉格朗日乘数法求解补偿电流，在最优安装节点输出所求补偿电流，等效增加谐波源，返回步骤 2。

3 算例验证

选择如图 4 所示的 IEEE 33 节点配电网验证所提优化配置算法的有效性，图中二极管符号代表非线性负荷，具体表现为谐波电流占基波电流的百分比。通过在原始电网的基础上增加非线性负荷，并依据网内谐波分布进行有源滤波器的优化配置。结合现场谐波检测的结果主要考虑非线性负荷的 5、7 次谐波，为方便分析，将其用谐波源等效替换，各次谐波含量见表 2，其余节点谐波均设置为 5 次含量 6%，7 次含量 3%，谐波源总电流有效值为 140 A。

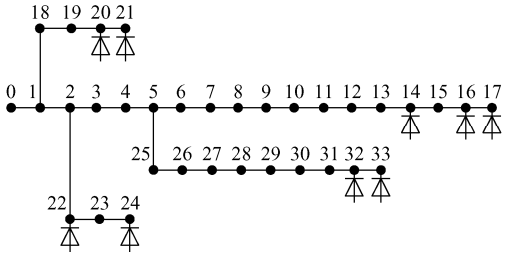


图 4 IEEE 33 节点算例

Fig. 4 Example of IEEE 33-bus distribution network

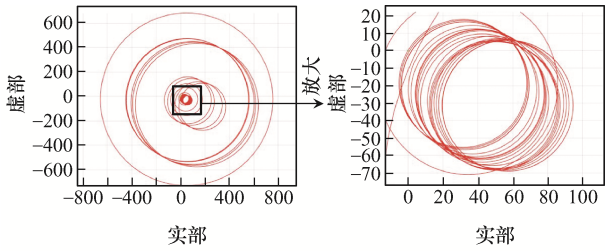
表 2 各节点谐波含量

Tab. 2 Harmonic content at each node

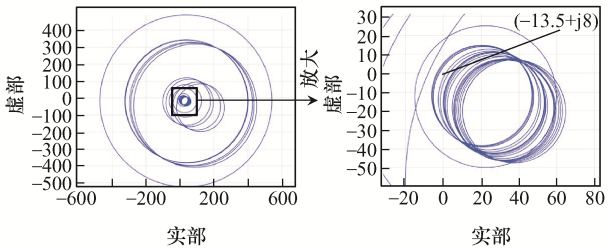
节点编号	5 次谐波含有率/%	7 次谐波含有率/%
14	50	36
16	52	32
17	51	34
20	51	32
21	53	33
22	54	37
24	51	33
32	51	36
33	51	35

根据上述有源滤波器配置结果，网络内各节点约束圆圆心可由式(13)得到，通过式(14)对 33 个节点求解治理系数，对治理系数排序得节点 7 为有源滤波器最优配置节点，利用有源滤波器对网内谐波进行迭代优化补偿的过程中，各节点圆心群的位置变化如图 5 所示，随着迭代次数增加，33 个约束

圆出现公共区域。当有源滤波器补偿电流落入圆内，可以使该点谐波电压满足要求，只需将补偿电流落入所有圆的公共区域即可让 33 个节点的谐波都满足要求，同时选择补偿电流距离原点最近即可满足最小有源滤波器容量。单独有源滤波器方案在节点 7 添加 32 A 容量的有源滤波器，保证网内所有节点满足国家标准要求，远小于谐波源总电流，证明所提有源滤波器方法的有效性。



(a) 5次谐波特征圆



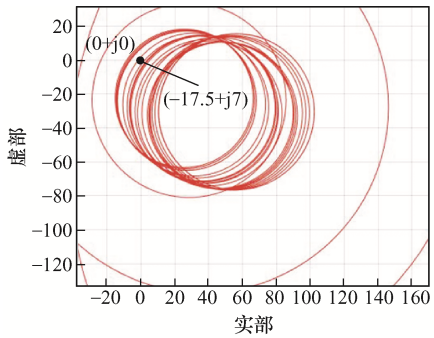
(b) 7次谐波特征圆

图 5　有源滤波器方案中 IEEE 33 系统各节点的目标函数圆

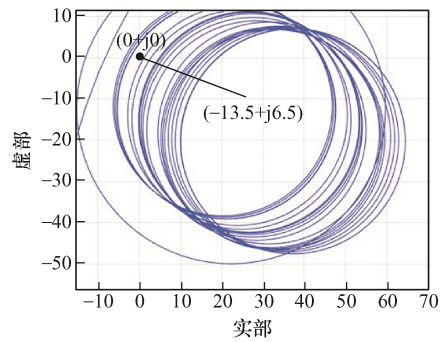
Fig. 5 Objective function circles for nodes in IEEE 33-bus system under active filter scheme

为进一步减小有源滤波器容量，在谐波电流较大的各个节点，即表 2 所列节点，依据式(4)进行无源滤波器设计，仅针对占主导的 5 次谐波加装无源滤波器。对比图 6(a)和图 5(a)可以看出，有源滤波器滤除 5 次谐波的部分由 27.78 A 下降至 18.85 A，降低 32%，同时对其他次谐波也产生抑制效果，7 次谐波含量由 15.69 A 下降至 15.00 A。证明无源、有源混合方案有助于进一步提升谐波治理的经济效益。

针对表 2 所示的电网的 THD 含量，对单独使用无源滤波器、单独使用有源滤波器及混合方案进行对比，结果如图 7 所示。单独使用无源滤波器方案在表 2 所列节点依据上文设计方案投入无源滤波器滤除 5 次谐波，无源滤波器具有成本低的优势，治理后将全网 THD 下降了 1%，但由于电网谐波含量较大，治理后未符合国家标准，进一步投入无源滤波器将提高谐振的风险；单独使用有源滤波器方案依照目标函数要求将电网所有节点电压限制在 5%以内，如图 5 所示于节点 7 总共投入了 32 A 的有源滤波器，将 THD 降低了 2%，实现了全网谐波治理；混合方案一方面减小约 25%的有源滤波器投入，另一方面取得更优的治理效果，将 THD 降低了 3%，为电网未来生产增加非线性负荷留有裕量。结果证明了在广域分布的大量非线性负荷接入情况下，本文所提油田配电网双层谐波优化补偿方法的有效性。



(a) 5次谐波特征圆



(b) 7次谐波特征圆

图 6　混合方案中 IEEE 33 各节点的目标函数圆

Fig. 6 Objective function circles for nodes in IEEE 33-bus system under hybrid scheme

进一步验证理论分析的准确性，选取油田某变电站 314 线下电网进行谐波综合治理。首先对谐波源集中区域增加无源滤波器，经过优化加装 150 A 有源滤波器于最优安装节点，同时抑制网络内采油场、输油站、注水站的谐波污染。图 8 为未使用治

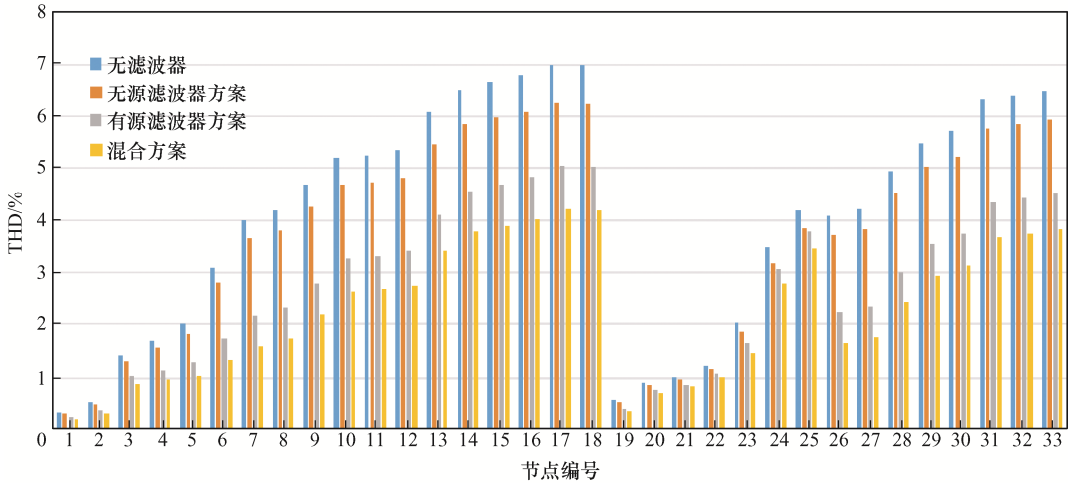


图 7 IEEE 33 节点系统中各节点的谐波电压 THD 对比

Fig. 7 Comparison of THD of harmonic voltage among nodes in IEEE 33-bus system

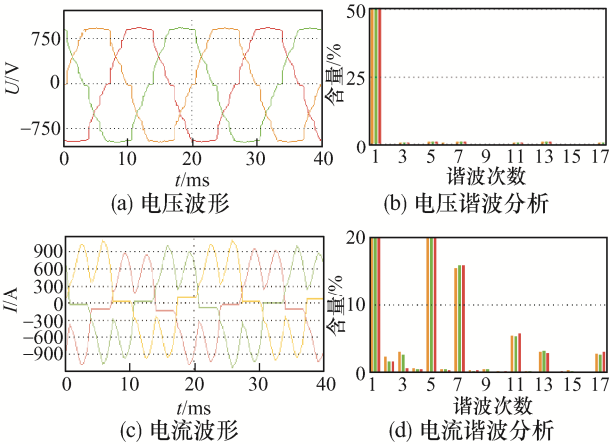


图 8 治理前电压电流波形及其谐波分析

Fig. 8 Voltage and current waveforms before governance, and corresponding harmonic analysis

理装置电能质量情况，电压 THD 为 7.2%，电流 THD 为 44.5%，超出国家标准要求。电压、电流波形畸变严重，经过变压器将谐波注入 10 kV 母线，造成母线波形畸变，产生额外的无功损耗，危害用电设备安全。

治理后电压、电流波形及其谐波分析如图 9 所示，通过电能质量综合治理，电网中的电压 THD 从 7.2%降低至 2.1%，电流 THD 从 44.5%降低至 7.1%。电压、电流均满足国家标准要求，避免因谐波含量过高导致用电设备损坏，证明了无源滤波及有源滤波混合方案的有效性。同时功率因数明显提升，且电流有效值显著下降。通过图 10 所示治理前后电能数据对比可知，在并网带电运行工况下，有功功率减小 24%，无功功率减少 28%，可极大降低设备的电能消耗，为油田生产带来经济效益。

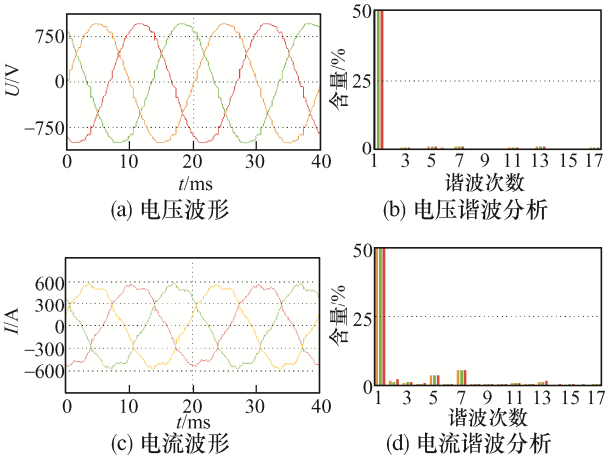
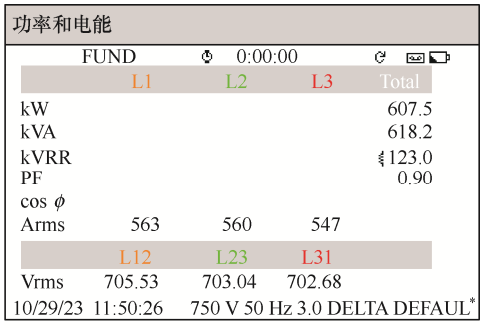
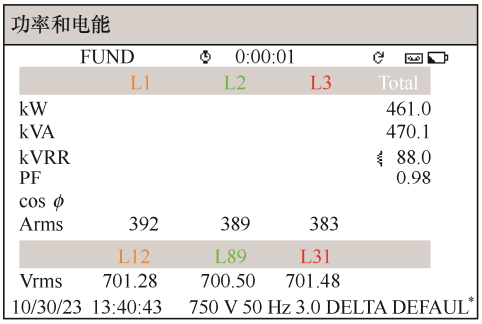


图 9 治理后电压电流波形及其谐波分析

Fig. 9 Voltage and current waveforms after governance, and corresponding harmonic analysis



(a) 未使用治理装置电能图



(b) 使用治理装置后电能图

图 10　治理前后电能数据对比

Fig. 10 Comparison of power data before and after governance

4　结语

本文测量评估电能质量现状，结合源-荷广域分布的复杂特性，通过对负荷溯源分析揭示现有治理策略的不足；进一步提出无源和有源混合谐波抑制策略，在下层谐波源使用成本低、维护周期长的无源滤波器，同时在上层使用补偿范围广的有源滤波器，基于有源滤波器多节点谐波补偿策略，对其安装位置及补偿容量进行优化配置，抑制配电网整体谐波潮流，实现了谐波区域治理，降低了有源滤波器建设成本。最后以变电站某出线下局域网络进行实验验证，证明了所提方法的有效性和经济性。

参考文献：

[1] 吴悦. 胜利油田 220 kV 电网安全稳定分析及提升策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
Wu Yue. Research on safety and stability analysis and improvement strategy of 220 kV power grid in Shengli oilfield [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)

[2] 何晋伟, 孟维奇, 蒋玮, 等. 新能源配电网电能质量典型问题分析及应对策略[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2983-2994.
He Jinwei, Meng Weiqi, Jiang Wei, et al. Power quality problems in renewable energy power distribution systems: Analysis and solutions [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2983-2994. (in Chinese)

[3] Wang Xiongfei, Blaabjerg F. Harmonic stability in power electronic-based power systems: Concept, modeling, and analysis [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(3): 2858-2870.

[4] 杨平原. 油田电网谐波研究与治理[D]. 大庆: 东北石油大学, 2018.
Yang Pingyuan. Harmonic research and management of oilfield network [D]. Daqing: Northeast Petroleum University, 2018. (in Chinese)

[5] 兰金晨, 林国栋, 晁武杰, 等. 基于 APF 的电网背景谐波抑制方法研究[J]. 电力电子技术, 2023, 57(8): 66-70.
Lan Jinchen, Lin Guodong, Chao Wujie, et al. Research on method of grid background harmonic suppression based on APF [J]. Power Electronics, 2023, 57(8): 66-70. (in Chinese)

[6] 杨玉岗, 孙鹤鸣. CLC 型 PWM 逆变器端无源滤波器的设计[J]. 电源学报, 2021, 19(3): 33-39.
Yang Yugang, Sun Heming. Design of CLC-type PWM inverter passive filter [J]. Journal of Power Supply, 2021, 19(3): 33-39. (in Chinese)

[7] 文翌铖, 陈亦文, 童筱涵, 等. 基于改进有限状态多步模型预测控制的 MMC-APF 技术研究[J]. 电源学报, 2024, 22(S1): 186-196.
Wen Yicheng, Chen Yiwen, Tong Xiaohan, et al. Research on MMC-APF technology based on improved finite-state multistep model predictive control [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(S1): 186-196. (in Chinese)

[8] Zhai Hao, Zhuo Fang, Zhu Chengzhi, et al. An optimal compensation method of shunt active power filters for system-wide voltage quality improvement [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 1270-1281.

[9] 郑征, 田世克, 张国澎. 指定次谐波补偿并联型有源滤波器电流重构限流策略[J]. 电源学报, 2018, 16(5): 59-66.
Zheng Zheng, Tian Shike, Zhang Guopeng. Current-limiting strategy for current reconstruction of shunt active power filter with specified sub-harmonic compensation [J]. Journal of Power Supply, 2018, 16(5): 59-66. (in Chinese)

[10] 苏敏超, 邹杰, 王雷, 等. 基于电能信息一体化传输的

APF 多机并联系统及其均流方法[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 25-35.
Su Minchao, Zou Jie, Wang Lei, et al. Multi-APF parallel system and current sharing method based on integrated energy and information transmission [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 25-35. (in Chinese)

[11] 张华赢, 李鸿鑫, 李艳, 等. 基于网络谐波电压综合补偿的配电网并联型有源电力滤波器优化配置策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 109-115.
Zhang Huaying, Li Hongxin, Li Yan, et al. Research on optimal allocation strategy of shunt active power filters in distribution network based on comprehensive suppression of network harmonic voltage [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 109-115. (in Chinese)

[12] 李双健, 贾秀芳, 季一鸣, 等. 基于 MMC 拓扑的混合型滤波器设计及其在 LCC-HVDC 中的应用[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(6): 115-120.
Li Shuangjian, Jia Xiufang, Ji Yiming, et al. Design of hybrid filter based on MMC topology and its application in LCC-HVDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(6): 115-120. (in Chinese)

[13] Lü Chunlin, Liu Jinjun, Zhang Yan, et al. An improved lifetime prediction method for metallized film capacitor considering harmonics and degradation process [J]. Microelectronics Reliability, 2020, 114: 113892.

[14] 徐福键, 朱建鑫, 周岩. LC 型三相无源滤波器设计[J]. 电力电子技术, 2023, 57(8): 32-35.
Xu Fujian, Zhu Jianxin, Zhou Yan. Design of LC type three-phase passive filter [J]. Power Electronics, 2023, 57(8): 32-35. (in Chinese)



张凡

作者简介：

张凡(1985—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：油田电网优化运行。E-mail：zhfan_cq@petrochina.com.cn。

顾沈卉(1976—)，女，硕士，高级工程师。研究方向：油田新型电力系统分析。E-mail：gush_cq@petrochina.com.cn。

崔田杰(2000—)，男，中国电源学会学生会员，通信作者，硕士。研究方向：电力电子设备的稳定性及电能质量优化。E-mail：cuitj@stu.xjtu.edu.cn。

赵泽玺(1990—)，男，本科，高级工程师。研究方向：油田电网继电保护分析。E-mail：zhaozx01_cq@petrochina.com.cn。

郭睿曦(2002—)，女，本科。研究方向：电能质量优化。E-mail：grx0808@stu.xjtu.edu.cn。

张岩(1983—)，男，博士，副教授。研究方向：电力电子在电力系统中应用，配电网电能质量优化。E-mail：zhangyanjtu@xjtu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)