

## 低频脉冲负载三相交流系统多功能补偿器特性分析与性能评估

朱建鑫, 张亚楠, 惠天元, 杨帆

南京邮电大学自动化学院 江苏南京

**【摘要】** 低频脉冲负载给电力系统的稳定运行带来巨大挑战。为改善电网电能质量、提升系统稳定性, 本文针对带低频脉冲负载的三相交流电力系统, 提出一种多功能补偿器 (MFCs), 具备同时补偿脉冲电流、谐波电流与无功电流功能。首先, 对 MFC 的两种电路配置 (即单级与两级结构) 进行了全面的分析与对比评估。结果表明, 单级结构在效率与简易性方面占优, 而两级结构则能提供更优的补偿性能, 并降低对解耦电容容值的需求。随后, 详细阐述了 MFC 的工作机理、调制策略及控制系统设计。最后, 研制了两款 MFC 实验样机进行测试, 测试结果表明所提 MFC 可以消除低频脉冲电流冲击, THD 从 65% 下降至 10% 以内, 验证了所提拓扑与控制方法的有效性与可行性。

**【关键词】** 低频脉冲; 多功能补偿器; 功率解耦; 调制策略

**【收稿日期】** 2025 年 11 月 5 日

**【出刊日期】** 2025 年 12 月 6 日

**【DOI】** 10.12208/j.jeea.20250233

### Characterization and performance evaluation of the multi-functional compensators for three-phase ac power system with low frequency pulsed load

Jianxin Zhu, Ya-nan Zhang, Tianyuan Hui, Fan Yang

College of Automation, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

**【Abstract】** Low-frequency pulse loads pose significant challenges to the stable operation of power systems. To improve the quality of grid power and enhance system stability, Multi-functional compensators (MFCs), which possesses the capability to simultaneously compensate the pulse current, harmonic current, and reactive current, are proposed for three-phase AC power system with low frequency pulsed load. A comprehensive analysis and comparative evaluation of the circuit configuration for the MFC, including single-stage and two-stage solution, are presented. Single-stage MFC has the advantage of efficiency and system simplicity, while two-stage solution has better compensation effect and reduced decoupling capacitor requirement. Operation principle, modulation strategy and control scheme for the MFCs are analysed in detail. Prototypes of two MFCs are built and tested. The test results indicate that the proposed MFC can eliminate the impact of low-frequency pulse current, with THD decreasing from 65% to within 10%, thus verifying the effectiveness and feasibility of the proposed topology and control method.

**【Keywords】** Low frequency pulsed power; Multi-functional compensator; Power decoupling; Modulation strategy

#### 1 引言

随着电力电子设备的广泛应用, 电能质量问题愈发凸显<sup>[1,2]</sup>。谐波、无功功率、电压暂降与暂升是电能质量的主要关注点, 其主要由非线性负载、无功负载及脉冲负载等引起<sup>[3]</sup>。脉冲负载在水处理<sup>[4]</sup>、材料加工<sup>[5]</sup>、射频应用<sup>[6]</sup>及雷达发射机<sup>[7]</sup>等领域的应用日益增多。此类低频脉冲负载具有高峰均功率比、低频周期性功率波动及功率变化极快等典型特征, 这与功率持续平稳的常规负载截然不同<sup>[8]</sup>。图 1 展示了一个典型的机载电

力系统三相交流电路, 其中非线性脉冲负载直接接入由交流电源供电的二极管桥式整流器。脉冲功率负载会对交流电源产生强烈的周期性扰动, 引发电网电压闪变、频率波动, 甚至危及系统稳定<sup>[10]</sup>。此外, 由于二极管整流器及 LC 元件的存在, 系统中还会产生谐波与无功电流, 如图 1 所示。因此, 为提升含低频脉冲负载的交流电力系统的电能质量, 需采用一种多功能补偿器 (Multi-functional Compensator), 以实现脉冲功率与交流电源的解耦, 并同步补偿谐波与无功电流。

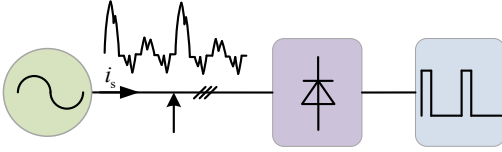


图1 带脉冲负载的交流电源系统

## 2 MFC 的系统结构

### 2.1 系统结构

图2展示了含MFC与非线性脉冲负载的三相交流系统关键工作波形, 其中 $i_{dc}$ 为直流脉冲电流,  $i_L$ 为二极管整流器的输入电流。MFC与负载并联, 其作用是将脉冲功率从交流电源中解耦并补偿谐波, 从而使电源电流 $i_s$ 保持正弦。MFC采用一个双向三相AC/DC变换器, 其交流侧接至交流电源, 直流侧则连接解耦电容 $C_s$ , 以达到脉冲功率与谐波补偿的目的。 $p_L$ 、 $P_d$ 、 $P_s$ 和 $P_{av}$ 分别表示负载的瞬时功率、动态功率、稳态功率和平均功率;  $i_d$ 与 $i_s$ 为对应的负载电流;  $v_{Cs}$ 为解耦电容电压。在脉冲导通区间( $t_1$ - $t_2$ )内, 脉冲功率 $P_d$ 大于电

源提供的平均功率 $P_{av}$ , 解耦电容 $C_s$ 放电以弥补功率缺额, 其电压 $v_{Cs}$ 随之下落。在脉冲关断区间( $t_2$ - $t_3$ )内, 稳态功率 $P_s$ 小于 $P_{av}$ ,  $C_s$ 被充电以吸收冗余功率, 电压 $v_{Cs}$ 上升。除实现脉冲功率解耦外, MFC还在整个工作周期内同步补偿由二极管整流器产生的无功电流与谐波电流。

### 2.2 MFC 电路配置

电能质量、解耦电容的体积与容量及变换器效率, 是MFC设计中的关键考量。为充分利用储能以减小电容的尺寸与容值, 解耦电容电压 $v_{Cs}$ 需能在较大范围内波动。图3(a)所示的单级AC/DC变换器是一种可行方案, 其中 $C_s$ 直接接于变换器直流侧。鉴于电压源型变换器(VSC)的降压特性,  $v_{Cs}$ 必须始终高于交流线电压峰值 $V_{ACPK}$ 。为增大储能以减小解耦电容, 就需提高 $v_{Cs}$ 的峰值, 如图4(a)所示, 但这会增大AC/DC变换器的电压应力。此外, 由于 $v_{Cs}$ 的最小值仍高于 $V_{ACPK}$ , 其储能能量未被充分利用。然而, 得益于交流母线与解耦电容间的直接功率变换, 此拓扑仍能实现较高效率。

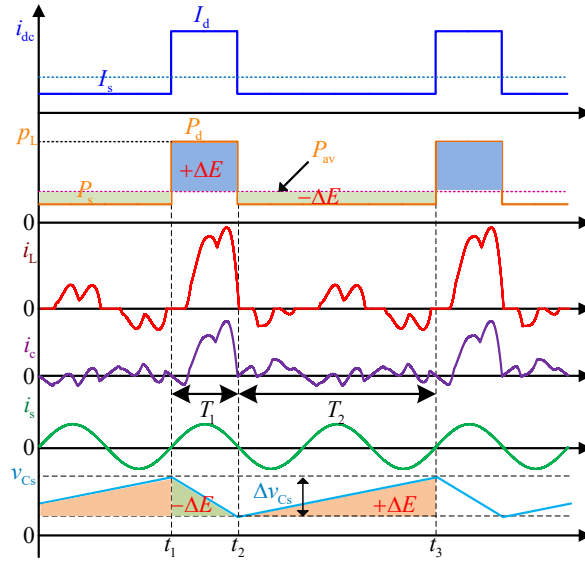


图2 含MFC的三相交流系统运行波形

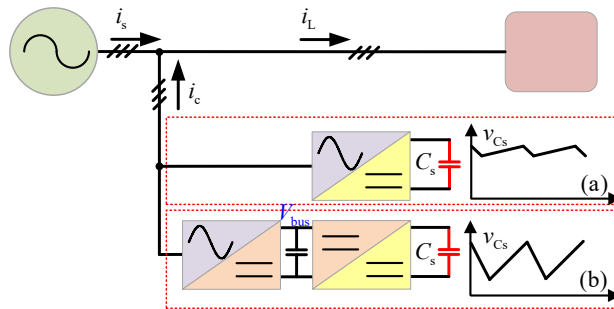


图3 MFC 的电路结构: (a) 单级, (b) 两级

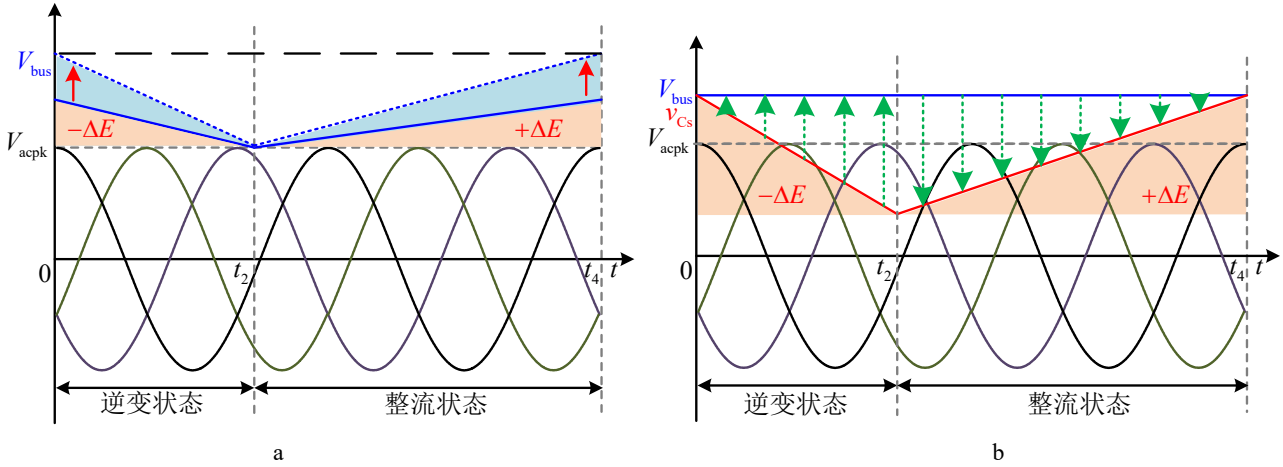


图4 MFC的工作模式: (a) 单级, (b) 两级

为降低功率器件的电压应力并充分利用电容储能, 可采用图 3 (b) 所示的两级电路。在该方案中, 储能电容  $C_s$  理论上可完全放电至较低电压, 以深度补偿脉冲功率, 而中间直流母线电压  $V_{bus}$  在补偿期间维持恒定, 从而满足 AC/DC 变换器的正常工作条件。稳定的直流母线电压带来了更优的补偿性能。然而, 能量需经  $V_{bus}$  进行两级转换 (见图 4 (b)), 也导致了更高的功率损耗。MFC 详细工作原理与控制方法将在下一节阐述。

### 3 工作原理与控制方案

如图 4 所示, MFC 的工作过程可分为逆变与整流两种模式。在脉冲导通区间 ( $0-t_1$ ), MFC 工作于逆变模式, 向负载提供脉冲功率的缺额; 在脉冲关断区间 ( $t_1-t_2$ ), MFC 工作于整流模式, 从电网吸收盈余功率。

#### 3.1 单级 MFC

单级 MFC 的控制框图如图 5 所示, 其核心包含直流电压 ( $V_{bus}$ ) 控制与补偿电流控制。其中, 电压外环通过一个比例积分 (PI) 控制器, 将解耦电容电压  $V_{bus}$  (即  $v_{Cs}$ ) 的峰值维持在恒定值; 同时, 利用另一个 PI 控制器生成零序调制信号  $u_o$ , 用以平衡两个部分电容的电压。补偿电流控制旨在同时抑制高频谐波、基波无功以及低频脉冲电流。因此, 在  $d$  轴坐标系下的电流参考值  $i_{dref}$  应包含谐波与瞬态脉冲分量。鉴于低通滤波器 (LPF) 的特性, 两者均被视为“谐波”处理。如图 5 所示, 可通过 LPF 从脉冲负载电流  $i_{Ld}$  中提取出其稳态有功分量  $i_{Ld1f}$ 。瞬时值  $i_{Ld}$  与稳态值  $i_{Ld1f}$  的差值, 即“谐波”分量  $i_{LdH}$ , 便作为补偿器的电流参考值  $i_{ref}$ 。为保障网侧电流的稳定性, 该 LPF 的带宽必须足够低。负载无功电流  $i_{Lq}$  用作  $q$  坐标系中 MFC 的电流参考值以补

偿无功功率。采用比例积分谐振 (PIR) 调节器来补偿脉冲电流和谐波, 其中在  $dq$  坐标系中采用一个中心频率为  $\omega_n = 600\pi$  的准谐振控制器。

本文采用注入零序信号  $u_{o1}$  的载波脉宽调制 (CBPWM) 策略, 以提高直流侧电压的利用率。 $u_{o1}$  的表达式如下:

$$u_{o1} = -\frac{1}{2}(u_{\min} + u_{\max}) \quad (1)$$

$$u_{\min} = \min(u_a, u_b, u_c), u_{\max} = \max(u_a, u_b, u_c) \quad (2)$$

其中,  $u_a, u_b, u_c$  为原始的正弦调制信号。

#### 3.2 两级 MFC

两级 MFC 的控制框图如图 6 所示, 其包含  $V_{bus}$  控制、 $V_{Cs}$  控制及补偿电流控制三部分。与单级方案相比, 该方案增设对 DC/DC 变换器的额外控制, 具体采用外电压环与内电流环的双环控制结构。两级 MFC 的控制方案有别于光伏逆变器、电动汽车充电系统等传统两级 AC-DC 变换结构。在传统方案中, AC/DC 变换器负责稳定直流母线电压  $V_{bus}$ , 而 DC/DC 变换器则控制储能端口电压  $v_{Cs}$ 。然而在本方案中, 解耦电容电压  $v_{Cs}$  需在大范围内波动以实现与电网的功率交换, 而  $V_{bus}$  则维持恒定。因此, 代表 MFC 总功率需求的  $v_{Cs}$  端口由前级 AC/DC 变换器控制, 而  $V_{bus}$  端口则由后级 DC/DC 变换器在逆变与整流模式下进行调控。其所采用的调制策略与单级 MFC 相同。

### 4 解耦电容的分析与比较

以表 2 中给出系统规格的三相功率系统为例, 探讨解耦电容器的设计考虑因素。

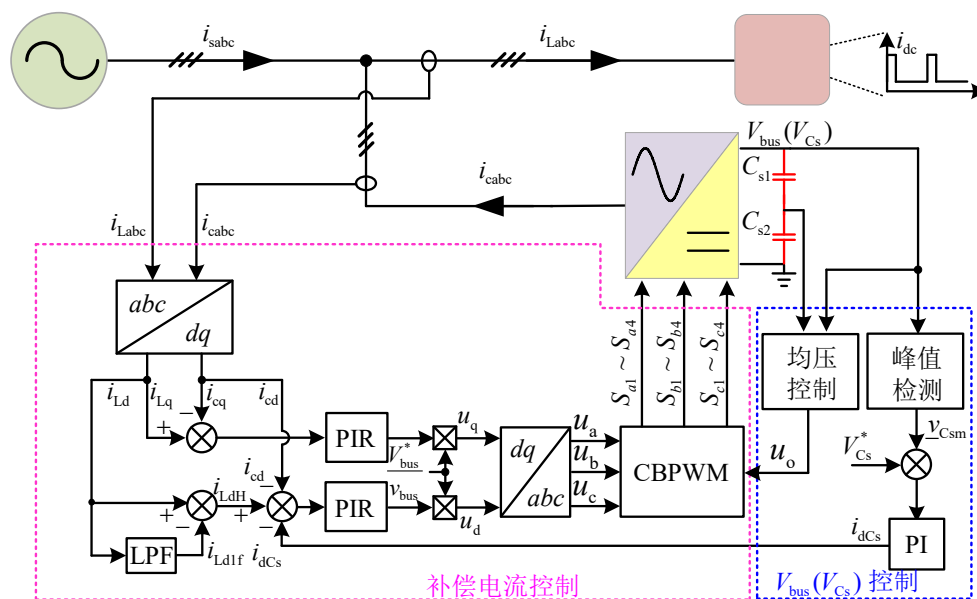


图 5 单级式 MFC 控制框图

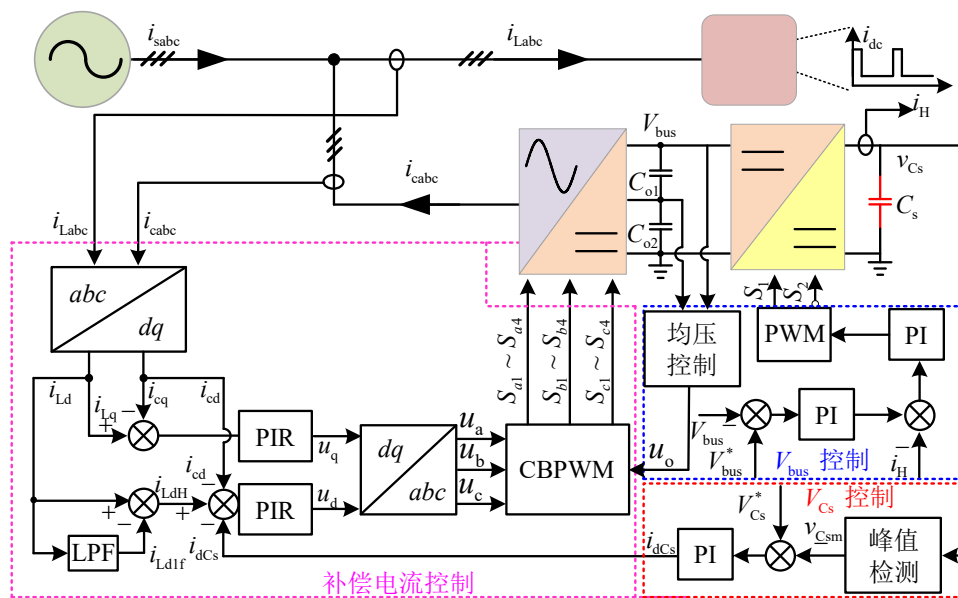


图 6 两级式 MFC 控制框图

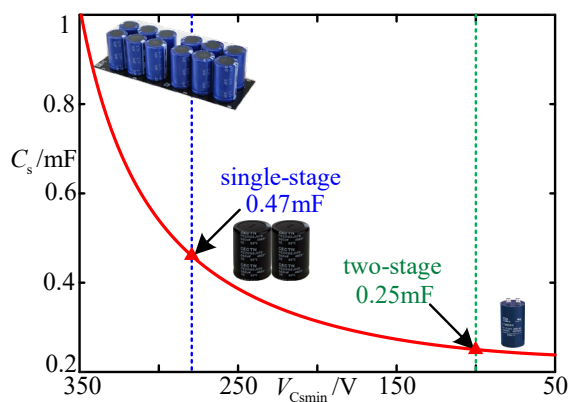


图 7  $C_s$  和  $V_{Csmin}$  的关系

表 1 系统规格参数

参数	数值
交流电压有效值 $V_s/V$	110
峰值功率 $P_d/W$	2000
静态功率 $P_s/W$	500
脉冲频率 $f_p/Hz$	12.5~25
脉冲周期 $T_p/ms$	40~80
脉宽时间 $T_1/ms$	10

考虑到变换器的瞬态电压过冲, 对于 110V 交流系统, 选用 450V 额定电压的电解电容, 选定  $V_{Csmax}=V_{bus}=400V$ 。在给定  $V_{Csmax}$  的情况下, 解耦电容的容值由  $V_{Csmin}$  决定, 因此宜选用较低的  $V_{Csmin}$ , 以利于减小去耦电容器的值。

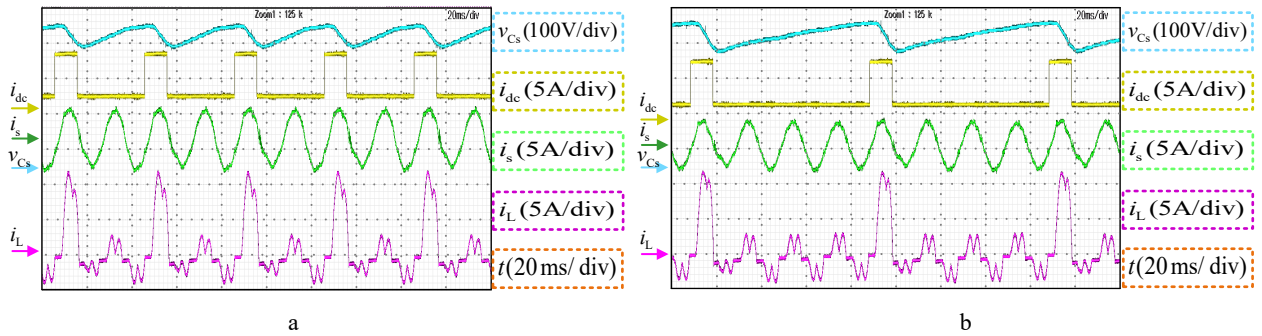
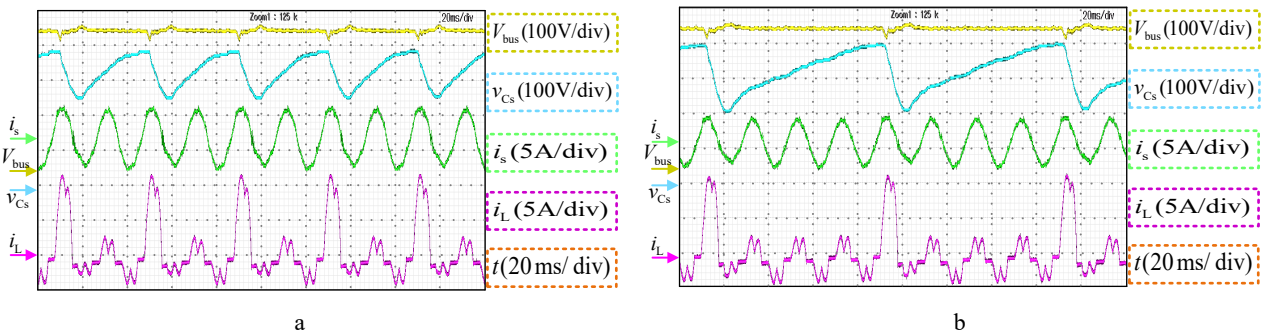
图 7 展示了  $V_{Csmin}$  与  $C_s$  之间的关系。若采用单级结构,  $V_{Csmin}$  由  $V_{ACPK}$  决定, 例如对于 110V 三相交流系统,  $V_{ACPK}$  为 270V。若考虑交流电网电压有  $\pm 5\%$  的变化, 则单级结构需要 0.47mF 的解耦电容。当  $V_{Csmin}$  小于 100V 时, 继续减小  $V_{Csmin}$  难以进一步降低  $C_s$ 。因此, 对于两级解决方案, 选择  $V_{Csmin}=100V$ , 确定  $C_s=0.25mF$ 。因此, 与单级结构相比, 两级解法大约减少了 50% 的去耦电容。因此, 与单级结构相比, 采用两级解法可减少约 50% 的解耦电容容值。

## 5 实验验证与分析

为验证所提出的 MFCs 及其控制策略的有效性, 依据表 2 的系统规格研制了一台原理样机, 并采用德州仪器 TMS320F28335DSP 作为数字控制器。样机关键参数如下: 功率开关管: IKW30N65H5; 三相滤波电感  $L_a, L_b, L_c$ : 1.6mH; 三相滤波电容  $C_a, C_b, C_c$ : 4 $\mu$ F; 支撑电容  $C_o$ : 0.1mF; 解耦电容  $C_s$ : 0.25mF 与 0.47mF。需要强调的是, 单级与两级解决方案所采用的规格、元器件及 PCB 板均完全一致。

### 5.1 脉冲功率补偿测试

单级与两级 MFC 在 12.5Hz 与 25Hz 脉冲频率下的稳态补偿波形, 分别如图 8 与图 9 所示。由图可知, 两种 MFC 均能同时对脉冲电流与谐波电流进行有效补偿, 从而获得正弦度良好的电网电流。

图 8 单级 MFC 稳态补偿波形 (a)  $f_p=25Hz$ , (b)  $f_p=12.5Hz$ 图 9 两级 MFC 稳态补偿波形 (a)  $f_p=25Hz$ , (b)  $f_p=12.5Hz$



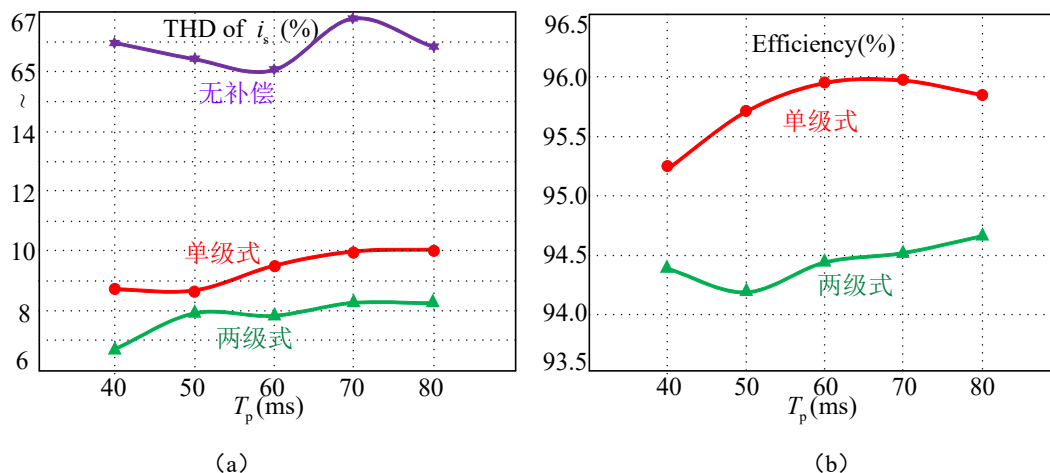


图 10 MFC 效率与 THD 比较 (a) THD, (b) 效率

## 5.2 性能比较

两种结构在相同开关频率下的测试 THD 与效率对比如图 10 所示。可见, 两种 MFC 电路均能显著提升带低频脉冲负载的交流系统之电能质量。得益于更少的功率转换级数, 单级电路的效率较两级电路高出约 1%~1.5%。然而, 受其直流电压大范围波动的影响, 单级 MFC 实现的 THD 性能逊于两级方案。

## 6 结论

本文研究了用于三相交流电力系统的低频脉冲功率解耦与高频谐波补偿的多功能补偿器。分别采用单级与两级交直流电路作为 MFC 的功率级, 并对其系统结构与性能进行了评估。单级电路实现了更高的效率, 而两级方案则减小了储能电容的容值与体积。同时, 得益于稳定的直流电压, 两级电路实现了更优的补偿效果。实验结果验证了所提出的多功能补偿器在三相交流电力系统中应用的有效性与可行性。

## 参考文献

- [1] Khadkikar, V.: 'Enhancing Electric Power Quality Using UPQC: A Comprehensive Overview', IEEE Trans. on Power Electron., 2012, 27, (5), pp. 2284-2297.
- [2] Devassy, S., Singh, B.: 'Control of solar photovoltaic integrated UPQC operating in polluted utility conditions', IET Power Electron., 2017, 10, (12), pp. 1413-1421.
- [3] 甄洪斌, 张晓锋, 沈兵, 等. 脉冲负荷对舰船综合电力系统的冲击作用研究. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 85-88.
- [4] Elserougi, A.A., Faiter, M., Massoud, A.M., et al.: 'A

Transformerless Bipolar/Unipolar High-Voltage Pulse Generator With Low-Voltage Components for Water Treatment Applications', IEEE Trans. Ind. Appl., 2017, 53, (3), pp. 2307-2319.

- [5] Akiyama, H., Sakugawa, T., Namihira, T., et al.: 'Industrial Applications of Pulsed Power Technology', IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., 2007, 14, (5), pp. 1051-1064.
- [6] Ji, C., Zanchetta, P., Carastro, F., et al.: 'Repetitive Control for High-Performance Resonant Pulsed Power Supply in Radio Frequency Applications', IEEE Trans. Ind. Appl., 2014, 50, (4), pp. 2660-2670.
- [7] Rodriguez, M., Roberg, M., Zai, A., et al.: 'Resonant Pulse-Shaping Power Supply for Radar Transmitters', IEEE Trans. on Power Electron., 2014, 29, (2), pp. 707-718.
- [8] Liu, Z., Wang, Y., Xie P., et al.: 'Research on Modeling and Simulation of Pulsed Power Loads', Third Int. Conf. on Instrumentation, Measurement, Computer, Communication and Control, Shenyang, 2013, pp. 893-896.
- [9] 刘正春, 朱长青, 王勇, 等. 脉冲负载下电力系统暂稳态功率特性. 电网技术, 2017(09):297-303.
- [10] Smolleck, H.A., Ranade, S.J., Prasad, N.R., et al.: 'Effects of pulsed-power loads upon an electric power grid', IEEE Trans. Power Del., 1991, 6, (4), pp. 1629-1640.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS