

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.240488

基于充电站谐波特性的频率自适应有源电力滤波控制策略

徐先峰, 马文昊, 卢勇, 于杨, 张震

(长安大学能源与电气工程学院, 陕西 西安 710064)

摘要: 随着分布式新能源在充电站的接入, 源荷的随机特性使电网基频发生波动, 进一步加剧站内谐波电流越限风险。对此, 提出了一种频率自适应的有源电力滤波谐波检测与跟踪策略。首先, 设计了一种改进式广义积分器与延时相消相结合的混合滤波器结构, 提高原有广义积分器的滤波性能和动态响应能力, 并可消除直流偏置及不平衡分量的影响。其次, 通过引入前馈补偿的改进锁相环消除频率波动引起的误差, 实现频率自适应谐波检测。最后, 基于频率波动导致的谐波跟踪误差, 采用结合无限脉冲响应滤波器的快速重复控制, 可依据检测频率实现动态调整。仿真和实验结果表明, 所提出的控制策略在充电负荷侧可稳定地检测电网频率。且在频率波动的工况下具有较优的谐波补偿能力, 在 32 ms 实现对谐波电流的补偿, 治理后电流谐波畸变率下降到 5% 以下, 对不同工况下的充电站具有通用性。

关键词: 充电站谐波; 频率自适应; 有源电力滤波; 广义积分器; 延时相消

Frequency adaptive active power filtering control strategy based on harmonic characteristics of a charging station

XU Xianfeng, MA Wenhao, LU Yong, YU Yang, ZHANG Zhen

(School of Energy and Electrical Engineering, Chang'an University, Xi'an 710064, China)

Abstract: With the connection of distributed new energy to a charging station, the random characteristics of source and load cause fluctuations in the fundamental frequency of the power grid, aggravating the risk of harmonic current off-limit in the station. Therefore, a frequency adaptive active power filter harmonic detection and tracking strategy is proposed. First, a hybrid filter structure combining an improved generalized integrator and delay signal cancellation is designed to enhance the filtering performance and dynamic response capability of the original generalized integrator, and to eliminate the influence of DC bias and unbalanced components. Secondly, by introducing an improved phase locked loop with feedforward compensation, the error caused by frequency fluctuations is eliminated, achieving frequency adaptive harmonic detection. Finally, based on the harmonic tracking error caused by frequency fluctuations, a fast repetitive control combined with an infinite impulse response filter is proposed. This can be dynamically adjusted according to the detection frequency. The simulation and experimental results show that the proposed control strategy can stably detect the grid frequency on the charging load side, and has better harmonic compensation ability in conditions of frequency fluctuation. It can compensate for harmonic currents in 32 ms and reduce the current total harmonic distortion to less than 5% after treatment, and it is universal for charging stations in different operating conditions.

This work is supported by the National Key Research and Development Program of China (No. 2021YFB1600200).

Key words: charging station harmonics; frequency adaptation; active power filtering; generalized integrator; delay signal cancellation

0 引言

为实现“双碳”战略目标、构建新型电力系统,

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2021YFB1600200);
长安大学中央高校基本科研业务费专项资金资助
(300102383203)

需要大力推动电动汽车及其充电设施产业化、规模化发展, 促进分布式新能源在充电站的接入^[1-3]。充电站内部的大量电力电子换流器^[4], 造成系统中存在谐波电流, 且电动汽车的充电时间、充电数量以及充电功率等多方面不确定因素都将对充电站谐波电流产生影响^[5]。电动汽车无序的充电行为和新能源出力的不稳定^[6-7], 使电网频率波动问题凸显, 造

成各次谐波电流的频率发生偏移, 同时充电站还面临着背景谐波、三相不平衡以及电流直流分量等多种工况的影响^[8], 对谐波电流的治理提出了更高的要求。

有源电力滤波器(active power filter, APF)因其较强的输出能力和补偿灵活多变等优点, 被广泛应用于充电站谐波治理中^[9-11]。APF 控制策略中的谐波检测和谐波跟踪决定了治理的动态响应能力和综合补偿能力。二阶广义积分器(second order generalized integrator, SOGI)和延迟相消(delayed signal cancellation, DSC)具有良好的动态性能, 被广泛应用于谐波电流检测中。有研究通过改进原有 SOGI 结构并应用在充电站电流检测中, 但频率降低造成性能的衰减^[12]。有学者依据频率变化实现对 SOGI 的动态调整^[13], 由于 SOGI 性能限制, 不具备直流分量抑制能力^[14], 以及对高畸变率的电流抑制效果欠佳, 难以满足充电站谐波检测需求。不同 DSC 算子的陷波特性和对指定频次谐波具有较优的滤波能力, 针对不同特征次谐波, 需设置多个 DSC 算子叠加使用, 进而导致设计的复杂度增加^[15]。针对频率变化导致 DSC 算子性能的衰减, 文献[16]通过负反馈补偿了幅值和相角误差, 但会造成高度非线性化, 降低系统的稳定性。文献[17]采用级联多个相同延迟算子增加陷波带宽, 实现了对低次谐波的频率自适应, 随着谐波次数的增加, 误差会进一步增大。重复控制(repetitive control, RC)应用在 APF 谐波检测之后, 可对基波周期信号进行无静差跟踪及倍频谐波信号的扰动消除^[18], 实现谐波电流的跟踪补偿。双模重复控制使奇次谐波具有更宽的谐振带宽, 减少频率变化对低次谐波的影响, 解决了频率的波动导致 RC 谐波抑制能力变差的问题^[19]。文献[20]通过改变采样频率实现对频率变化的动态调整, 但改变采样频率的方法使数字系统变得复杂化。

因此, 针对 SOGI 对谐波电流和直流分量抑制能力的不足, 以及多个不同参数的 DSC 算子频率自适应设计具有一定的复杂性, 本文提出了一种改进式广义积分器结构作为前置滤波, 同时发挥 DSC 的陷波特性, 引入单一 DSC 算子的环路滤波消除低次谐波。该混合滤波器的结构对频率波动产生的幅值误差较小, 仅需通过比例前馈支路对锁相环产生的相位误差进行补偿, 实现频率自适应谐波检测。为了提高频率波动时的补偿能力, 提出结合无限脉冲响应(infinite impulse response, IIR)滤波器的快速重复控制跟踪谐波, 并依据检测算法输出的频率动态调整。将该策略应用在有源电力滤波器中, 提高了频率波动时的充电站谐波电流抑制能力, 兼有较好

的动态性能, 并可在不同工况下稳定运行。

1 充电站谐波特性分析

充电机主要由三相 AC-DC 整流器、LC 滤波器和高频 DC-DC 变换电路组成^[21], 拓扑结构如图 1 所示。前级整流电路决定整个充电过程的谐波含量, 工程中常见的有不控整流、维也纳整流以及两电平整流等类型^[22]。

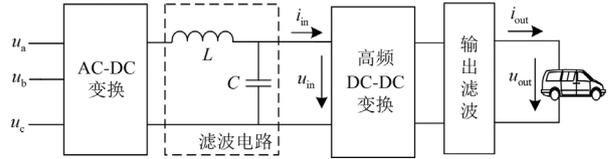


图 1 充电机结构

Fig. 1 Charger structure

在充电站中, 不同类型的充电机在充电过程中主要产生 $6k \pm 1$ 次谐波, 谐波次数与谐波电流幅值呈反比关系, 其中不控整流型充电机谐波畸变率较大^[23]。且随着充电机数量的增加, 谐波畸变率小幅降低^[24], 但由于系统中的各次谐波电流幅值成倍增加, 进一步加剧了谐波越限的风险。

当分布式新能源接入充电站时, 由于死区效应和调制效应, 导致逆变器输出的电压也存在 $6k \pm 1$ 次谐波, 背景谐波的存在使传输电缆的参数不能被忽视, 不同的传输距离造成背景谐波出现谐振放大现象^[25], 传输电缆等效电路如图 2 所示。

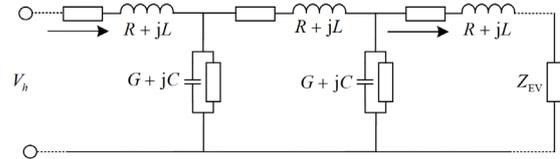


图 2 传输电缆等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of transmission cable

当电缆长度为 l 时, 在传输电缆上, 距离谐波电压源 x 处的谐波放大倍数^[26]如式(1)所示。

$$K = \frac{Z_{EV} \cos h[\gamma(l-x)] + Z_c \sin h[\gamma(l-x)]}{Z_{EV} \cos h(\gamma l) + Z_c \sin h(\gamma l)} \quad (1)$$

式中: Z_{EV} 为末端充电站等效阻抗; Z_c 为特征阻抗; γ 为传播常数; h 为谐波次数。忽略传输电缆的电阻和电导, 可得到特征阻抗 Z_c 、传播常数 γ 、 h 次谐波波长 λ_h 与 h 次谐波频率 f_h 的关系分别为^[27]

$$Z_c = \sqrt{\frac{j\omega L}{j\omega C}} = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2)$$

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC} \quad (3)$$

$$\lambda_h = \frac{1}{f_h \sqrt{LC}} \quad (4)$$

在理想状态下,将充电站近似看为短路^[28]。由式(4)可知,谐波次数越高,波长越短。结合式(1)一式(3),当 $l \geq \lambda_h / 4$ 时,不同位置处会出现谐波电压放大现象,且 $l = \lambda_h / 2$ 时,谐振放大最为严重^[29]。通常情况下,充电站接入电网的电缆长度较短,一般在3 km以内。因此,短距离的传输将造成11次及以上的背景电压谐波产生谐振放大现象。

此外,由式(4)可知,频率的波动使各次谐波波长发生变化,图3为3 km传输电缆在不同频率下的各点谐波电压放大倍数。

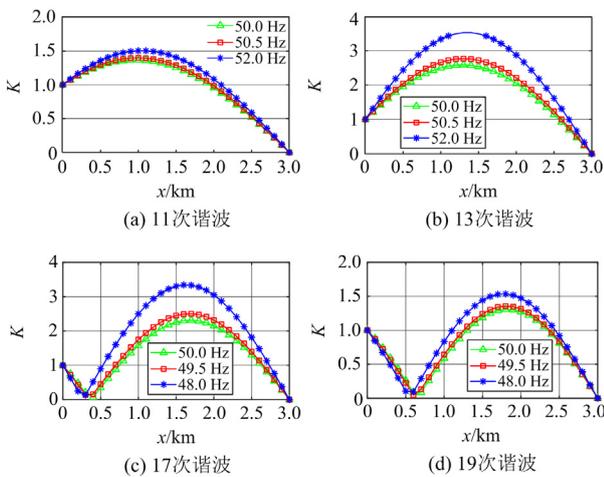


图3 频率变化对11、13、17、19次谐波谐振放大影响
Fig. 3 Effect of frequency variation on 11th, 13th, 17th and 19th harmonic resonance amplification

由图3可以看出,频率的波动将导致部分高次谐波的谐振放大倍数变大,高次谐波电压的放大将导致充电站网侧高次谐波电流的幅值进一步增大。

对于充电机自身工作特性而言,频率的降低会增加不控整流每个二极管的导通时间,导致谐波电流幅值变大。维也纳整流和两电平整流虽然可通过调整PWM控制信号来适应输入频率的变化,但在频率波动较大或控制系统未能适应时,系统中的谐波电流将会增加。同时,频率的降低使各次谐波频率点左移,通过网侧滤波电路的能力增强,也将增加网侧谐波电流。

基于以上分析,充电站内部存在 $6k \pm 1$ 次谐波电流,由于电压谐波的存在以及传输距离的不同,导致各次谐波的畸变率都可能较大。同时,频率的波动使充电站原有各次谐波进一步增加。因此,对高畸变率的充电负荷进行治理时,需要增强各次谐波的检测能力和跟踪精度,同时兼顾频率的自适应调整能力。

2 频率自适应谐波电流控制策略原理

APF通常并联接入充电站,对负荷侧谐波电流进行检测与跟踪。基于充电站 $6k \pm 1$ 次谐波在 $\alpha\beta$ 和 dq 坐标系下的表现形式,通过改进式广义积分器和延迟相消相结合的检测算法,得到电流基波正序分量,并计算出待补偿的谐波电流。检测出的谐波电流通过频率自适应快速重复控制实现谐波跟踪,产生主电路开关的SVPWM信号,最终驱动主电路实现对谐波电流的补偿,系统整体结构如图4所示。

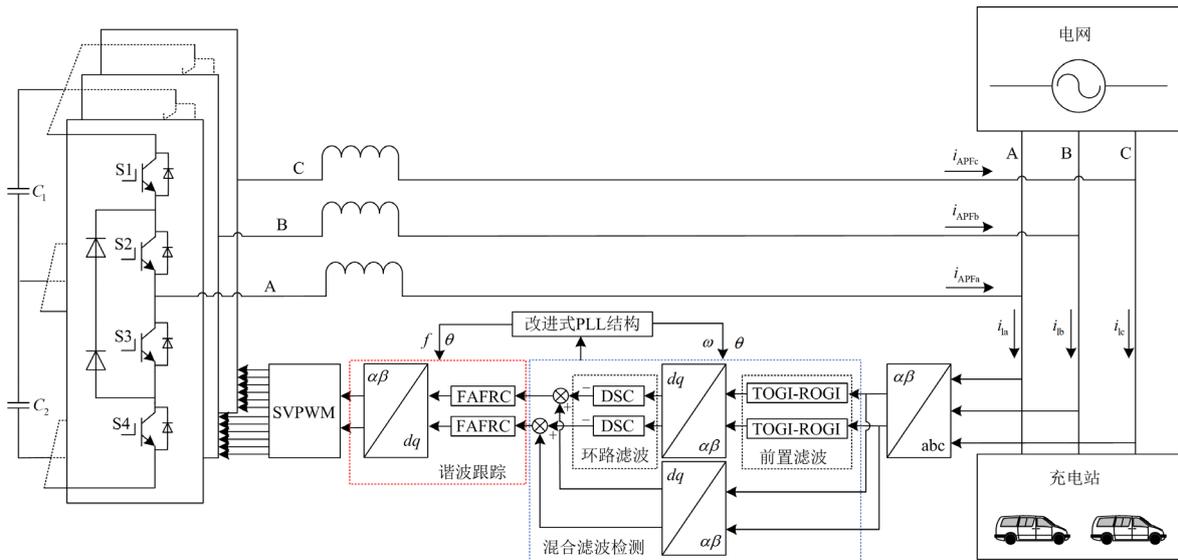


图4 系统整体结构

Fig. 4 Overall system structure

2.1 改进式广义积分器结构

广义积分器中的 SOGI 因其结构简单, 被广泛应用于并网系统^[30]。基本的 SOGI 结构如图 5 所示。 V_i 为输入信号, V_o 与 qV_o 为输出的两个正交信号。

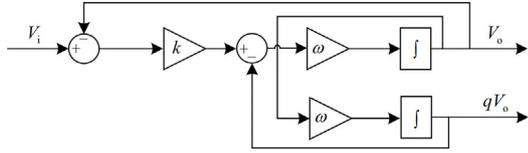


图 5 SOGI 结构

Fig. 5 SOGI structure

由图 5 可以得出 SOGI 的传递函数为

$$\begin{cases} D_{\text{SOGI}}(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \\ Q_{\text{SOGI}}(s) = \frac{qV_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ω 为基波角频率; k 为阻尼系数。可以看出, $D_{\text{SOGI}}(s)$ 为带通滤波器, 可抑制直流信号。 $Q_{\text{SOGI}}(s)$ 为低通滤波器, 无法消除输入信号的直流分量。三阶广义积分器(third order genralized integrator, TOGI)在 SOGI 的基础上通过额外的分支消除直流偏置, 如图 6 左边虚线(蓝色)所示。TOGI 传递函数为

$$\begin{cases} D_{\text{TOGI}}(s) = \frac{V_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \\ Q_{\text{TOGI}}(s) = \frac{qV_o(s)}{V_i(s)} = \frac{k\omega s(\omega - s)}{(s^2 + k\omega s + \omega^2)(s + \omega)} \end{cases} \quad (6)$$

式(6)中系数 k 的取值决定了 TOGI 的性能, 较低的 k 值可提高滤波能力, 但会降低动态响应能力。

更高阶的广义积分器也可提高滤波效果, 但增加了设计的复杂度, 同时动态响应能力变差。相反, 降阶广义积分器(reduced order general ized integrator, ROGI)的动态能力更优^[29]。ROGI 是具有单复极点的一阶滤波器, 如图 6 右边虚线(红色)所示, 传递函数为

$$D_{\text{ROGI}}(s) = Q_{\text{ROGI}}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + 2k\omega s + (1 + k^2)\omega^2} \quad (7)$$

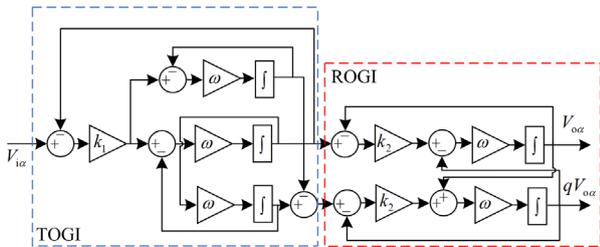


图 6 改进式广义积分器结构

Fig. 6 Improved generalized integrator structure

因此, 基于上述两种广义积分器的特性, 本文提出了一种新的广义积分结构, 将该结构作为 $\alpha\beta$ 坐标系下的前置滤波器, 如图 6 所示。

由图 6 可以看出, 改进式广义积分器结构通过 TOGI 与 ROGI 两个广义积分器的级联, 增强各次谐波的滤波能力, 减少了设计的复杂度。同时, 改善了动态条件下的系统响应, 并保持直流分量的抑制能力。TOGI-ROGI 的传递函数为

$$\begin{cases} D_{\text{TOGI-ROGI}}(s) = \frac{k_1 k_2 \omega^2 s^3 + k_1 k_2 (2 + k_2) \omega^3 s^2}{A(s)} + \frac{k_1 k_2 \omega^4 (k_2 - 1) s}{A(s)} \\ Q_{\text{TOGI-ROGI}}(s) = \frac{-k_1 k_2 \omega^2 s^3 + k_1 k_2 \omega^3 (2 - k_2) s^2}{A(s)} + \frac{k_1 k_2 \omega^4 (1 + k_2) s}{A(s)} \end{cases} \quad (8)$$

$$A(s) = (s + \omega)[s^4 + (k_1 + 2k_2)\omega s^3 + (2 + k_1 k_2 + k_2^2)\omega^2 s^2 + (k_1 + k_1 k_2^2 + 2k_2)\omega^3 s + (1 + k_2^2)\omega^4]$$

式中, k_1 和 k_2 为比例系数。 k_1 和 k_2 决定了改进式广义积分器的动态响应能力和滤波能力。不同参数下的伯德图和阶跃响应如图 7 和图 8 所示, 其中 ω 取值为 314 rad/s。

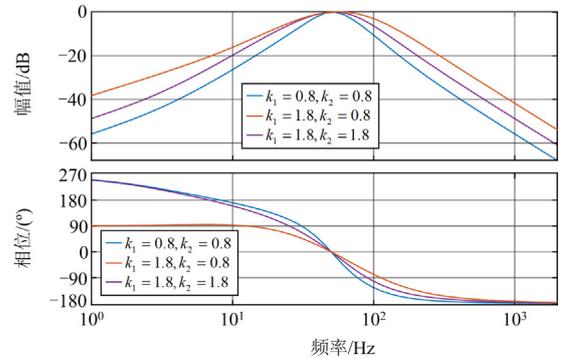


图 7 TOGI-ROGI 伯德图

Fig. 7 TOGI-ROGI bode diagram

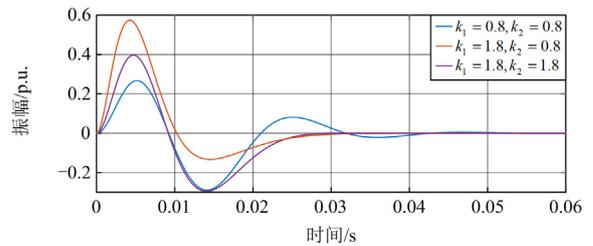


图 8 TOGI-ROGI 阶跃响应图

Fig. 8 TOGI-ROGI step response diagram

由图 7 和图 8 可以看出, 随着 k_1 和 k_2 的增加, TOGI-ROGI 的带宽逐渐增加, 动态响应速度变快, 但对谐波的滤波能力减弱。因此, 综合各方面考虑, 本文选取 $k_1 = 1.8$, $k_2 = 0.8$ 。

图 9 和图 10 分别对比了近似基波带宽频率下的 TOGI 和 TOGI-ROGI 的传递函数伯德图和阶跃响应曲线。

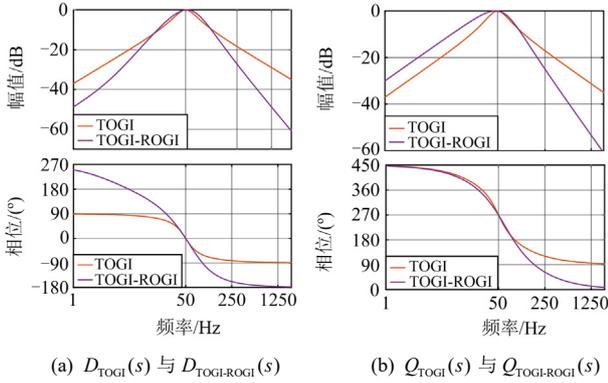


图 9 不同广义积分器的伯德图

Fig. 9 Bode plots of different generalized integrators

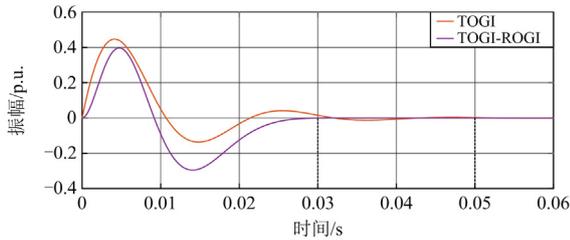


图 10 不同广义积分器的阶跃响应图

Fig. 10 Step response of different generalized integrators

由图 9 可以看出, 在基波同相输出和正交输出的信号中, 本文所提的改进式广义积分器在 $6k \pm 1$ 次谐波处都有更强的滤波能力, 且保留了直流信号抑制能力。由图 10 可以看出, TOGI 动态响应时间为 50 ms, TOGI-ROGI 的响应时间为 30 ms。因此, TOGI-ROGI 具有较优的滤波能力和动态响应能力。

为了消除单相和三相充电机同时接入产生三相不平衡信号对输出造成的影响, 基于 TOGI-ROGI 输出的正交信号, 加入图 11 所示的正负序分离模块, 可实现对正序分量的提取。

由于广义积分器的选频特性, 随着谐波次数的增高, 输出衰减变大, 对 11 次以上的谐波可衰减为原来的 99% 以上, 但对 5 次和 7 次的滤波效果相对较弱。当频率降低时, 谐波频率点的左移, 将进一步减弱 5 次和 7 次的谐波抑制能力。同时, 频率的变化也会造成输出的基波正交信号存在幅值衰减和

相位偏差。

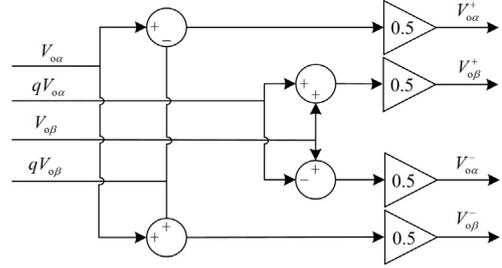


图 11 正负序分离模块

Fig. 11 Positive and negative sequence separation module

2.2 频率自适应谐波电流检测

Park 变换可将 5、7 次谐波分量转换为六倍频正弦交流分量, 如式(9)所示。

$$\begin{pmatrix} i_d \\ i_q \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos(\omega t) & \cos(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \\ -\sin(\omega t) & -\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) & -\sin(\omega t + \frac{2}{3}\pi) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{pmatrix} = i_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} + i_n \begin{pmatrix} \sum_{n=6k-1}^{\infty} \cos(n+1)\omega t \\ \sum_{n=6k-1}^{\infty} \sin(n+1)\omega t \end{pmatrix} + i_n \begin{pmatrix} \sum_{n=6k+1}^{\infty} \cos(n-1)\omega t \\ \sum_{n=6k+1}^{\infty} \sin(n-1)\omega t \end{pmatrix} \quad (9)$$

在原有改进式广义积分器的基础上, 提出一种混合滤波器结构, 引入 DSC 作为 dq 坐标系下的环路滤波器。DSC 结构如图 12 所示。

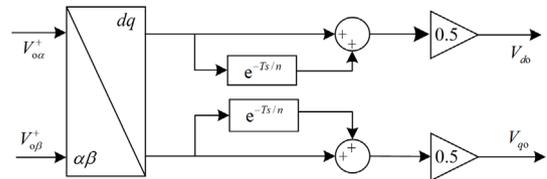


图 12 DSC 结构

Fig. 12 DSC structure

DSC 在 dq 轴上的传递函数如式(10)所示。

$$G_{dqDSC}(s) = \frac{V_{dqo}(s)}{V_{dqi}(s)} = \frac{1}{2} \left(1 + e^{-\frac{T}{n}s} \right) \quad (10)$$

式中: V_{dqo} 为输出信号; V_{dqi} 为输入信号; T 为基频周期; n 为延迟系数。 n 的取值决定了陷波频率点以及延迟时间, 当 $n=12$ 时, DSC 的陷波频率为 300 Hz, 延迟时间为 $T/12$, 以较小的延迟时间补偿了前置滤波的不足。

当频率波动时, 前置滤波对 11 次以上的高次谐波抑制能力衰减较小, 但相位和频率的变化使环路滤波性能偏移。锁相环可计算系统的相位和频率, 由于背景电压谐波可能导致原有电压锁相存在误

基于 IIR 的频率自适应快速重复控制(frequency adaptive fast repetitive control, FAFRC)原理如图 14 所示。

由图 14 可以得出 FAFRC 的传递函数为

$$G_{\text{FAFRC}}(z) = \frac{z^{-N_i} F(z) Q(z)}{1 - z^{-N_i} F(z) Q(z)} C(z) \quad (15)$$

式中： $Q(z)$ 为内模反馈系数，选取零相移低通滤波器 $Q(z) = (z^{-1} + 2 + z)/4$ ，提高系统的稳态精度和鲁棒性； $C(z) = K_r z^m S(z)$ ，补偿系统的幅值误差和相角， $S(z)$ 为二阶巴特沃斯滤波器，可实现高频的抑制； N_i 为采样频率与基波频率计算的整数延迟； $F(z)$ 为近似的分数阶延迟。

3 仿真与实验验证

为了验证本文提出的自适应有源电力滤波控制策略在充电站场景的可行性和有效性，在 Matlab/Simulink 环境下搭建仿真模型，其中主电路参数如表 3 所示。

表 3 有源电力滤波参数

Table 3 Active power filter parameters

参数	数值	参数	数值
直流侧参考电压 U_{dc}/V	800	交流侧电感 L/mH	8
直流侧上电容 $C/\mu F$	6000	阻尼电阻 R/Ω	0.5
采样频率 f_s/kHz	15	开关频率 f_{sw}/kHz	10

以畸变率较高的单台不控整流型充电机为例，图 15 对比了不同检测算法的锁相环输出频率，其中 0.5 s 接入 35 kW 充电机，1 s 处频率跳变为 48 Hz，1.5 s 处频率跳变为 52 Hz。

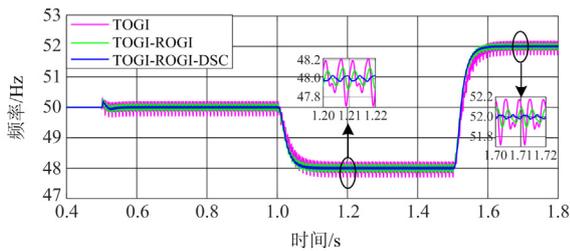


图 15 不同滤波器锁相环输出频率

Fig. 15 Different filter PLL output frequencies

由图 15 可以看出，在 3 种检测算法频率波动下的误差大约为 ± 0.2 Hz、 ± 0.1 Hz 和 ± 0.02 Hz。本文所提的混合滤波检测算法在充电负荷侧实现对频率高精度的计算，具有良好的动态性能，为谐波跟踪提供稳定的频率支撑。也进一步验证了在不同频率处，所提检测算法对高畸变率的充电负荷具有更优的滤波能力。

针对电动汽车无序不可控的充电行为，图 16 模拟充电站中不同充电机接入的动态治理效果，表 4 为四种工况下负荷侧电流和网侧电流的 THD 值。起始为一台 35 kW 充电机工作，0.1 s 接入 1 台 7 kW 的单相充电机，0.2 s 接入 1 台 35 kW 充电机，0.3 s 时 1 台 35 kW 充电机退出工作。

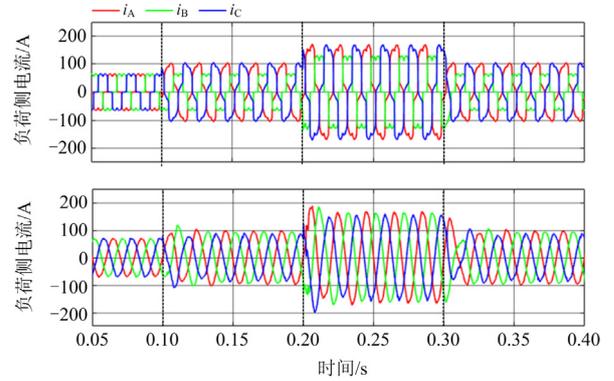


图 16 不同充电机接入治理后的电流波形

Fig. 16 Current waveform of different charger access

由图 16 可以看出该控制策略具有较好的动态响应，在 32 ms 左右可依据负荷的变化动态调整，同时三相不平衡的工况下依然保持稳定的补偿谐波能力。

表 4 不同工况三相电流 THD

Table 4 Three-phase current THD under different conditions

工况	负荷侧电流 THD			网侧电流 THD		
	A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
一	28.56	28.56	28.56	4.18	4.68	4.57
二	18.75	28.70	18.90	3.31	3.66	4.17
三	22.41	28.40	22.60	2.52	2.74	3.20
四	18.75	28.72	18.88	3.19	3.31	4.42

由表 4 可以看出治理后三相电流的 THD 值降为 5% 以下，有效抑制了系统谐波电流越限的风险。

为进一步验证所提控制策略在频率波动工况下的治理能力，在 Starsim/HIL 平台上进行了实验，采样频率设定为 15 kHz，并与基频 50 Hz 的固定参数控制策略进行比较。图 17 和图 18 为单台 35 kW 不控整流型充电机在 50 Hz 工况下的负荷侧电流波形和谐波频谱图。图 19 和图 20 为两种控制策略在 50 Hz 下的网侧电流波形和谐波电流频谱图。

由图 17 和图 18 可以看出，充电机的接入使负荷侧电流存在明显的畸变，主要含有 $6k \pm 1$ 次电流谐波。由图 19 和图 20 可以看出 APF 的接入使治理后三相电流正弦度明显提高，各次谐波电流幅值降低，解决了充电负荷产生的谐波问题，且在 50 Hz

下两种控制策略治理后的效果基本一致。

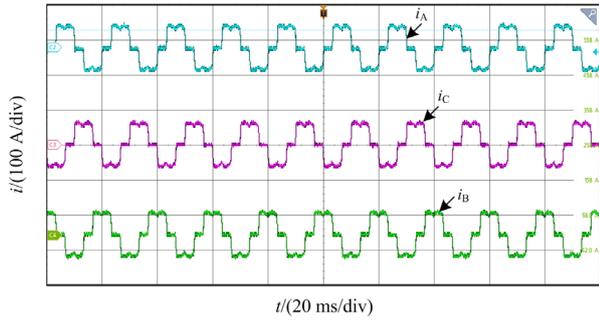


图 17 35 kW 不控整流充电机电流

Fig. 17 Current of 35 kW uncontrolled rectifier type charger

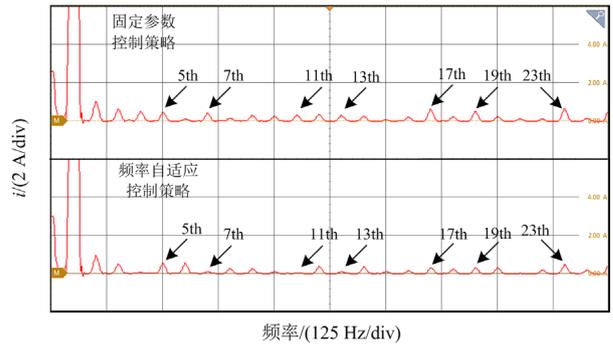


图 20 50 Hz 工况下两种控制策略电流谐波频谱图

Fig. 20 Current harmonic spectrum diagram of two control strategies under 50 Hz condition

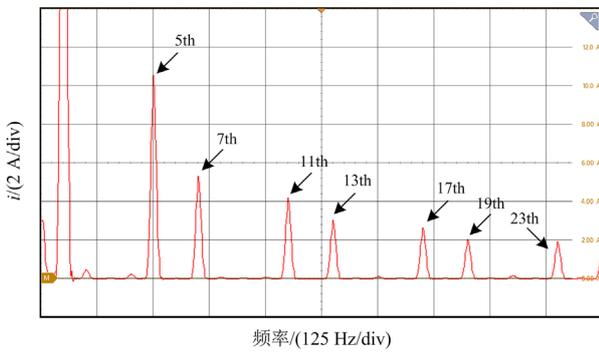
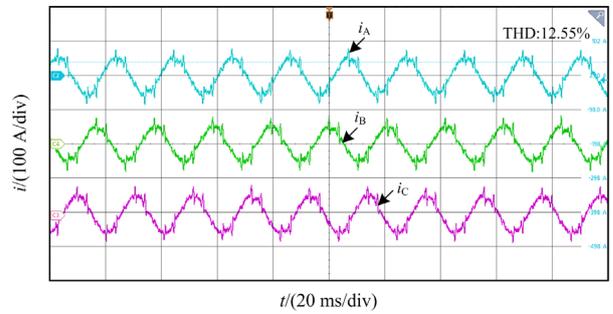


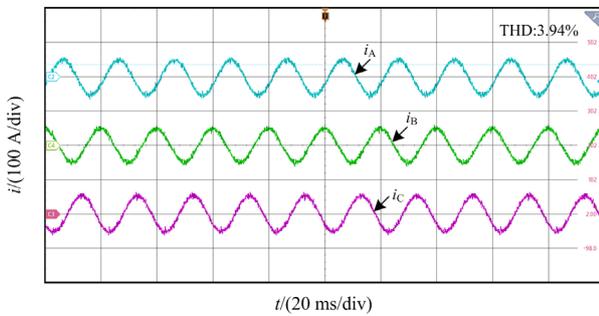
图 18 充电机负荷侧电流谐波频谱图

Fig. 18 Harmonic spectrum diagram of charger load current

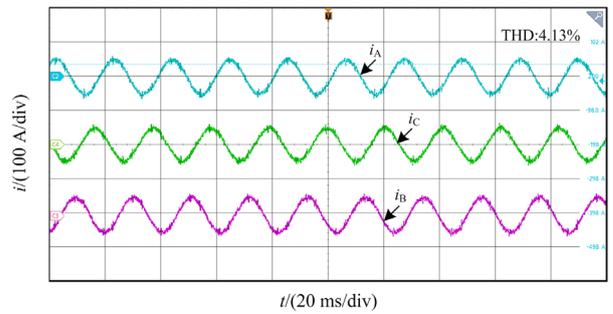
图 21 和图 22 给出了两种频率工况下治理后的电流波形对比图, 3 个通道依次为三相电流。



(a) 固定参数控制策略



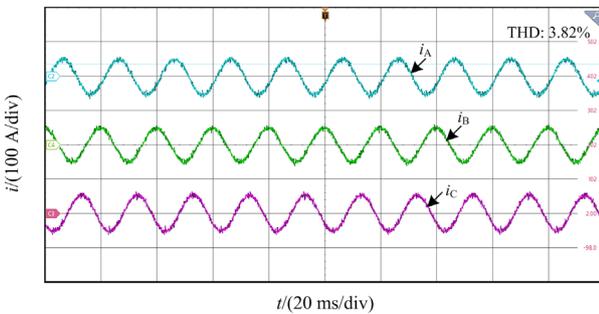
(a) 固定参数控制策略



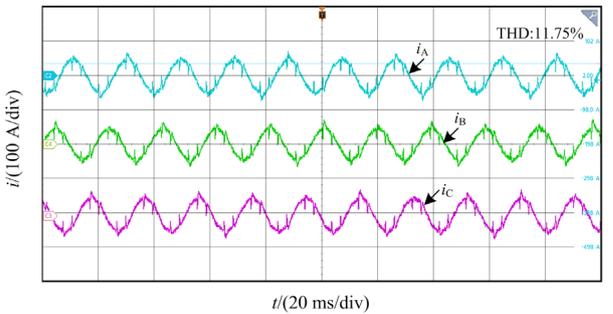
(b) 频率自适应控制策略

图 21 48 Hz 工况下治理后的电流波形

Fig. 21 Current waveform after treatment under 48 Hz condition



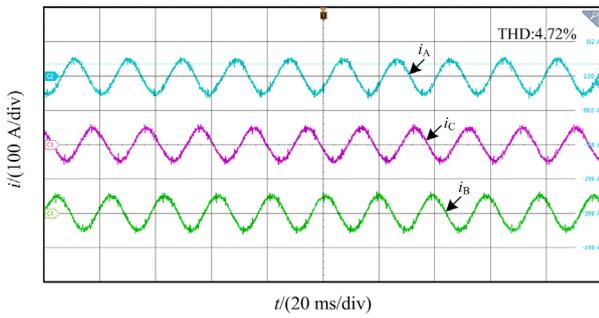
(b) 频率自适应控制策略



(a) 固定参数控制策略

图 19 50 Hz 工况下治理后电流波形

Fig. 19 Current waveform after treatment under 50 Hz condition



(b) 频率自适应控制策略

图 22 52 Hz 工况下治理后的电流波形

Fig. 22 Current waveform after treatment under 52 Hz condition

由图 21 和图 22 可以看出，固定参数下的控制策略无法高精度地检测与跟踪系统中的谐波电流，治理后的波形仍存在明显谐波，畸变率较大。本文所提出的控制策略在不同频率处具有较好的谐波跟踪能力，治理后的三相电流波形质量高，谐波电流畸变率稳定在 5% 以下。

图 23 和图 24 为两种频率工况下的谐波电流所对应的频谱图。

由图 23 和图 24 可以看出，在固定参数控制策

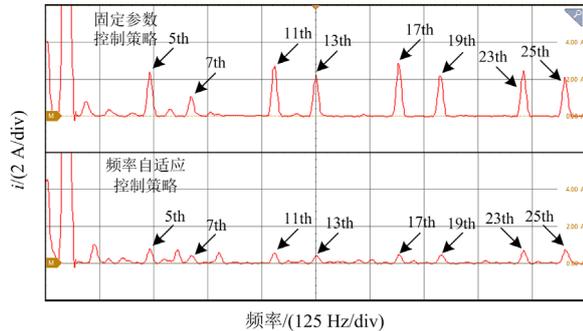


图 23 48 Hz 工况下两种控制策略电流谐波频谱图

Fig. 23 Current harmonic spectrum diagram of two control strategies under 48 Hz condition

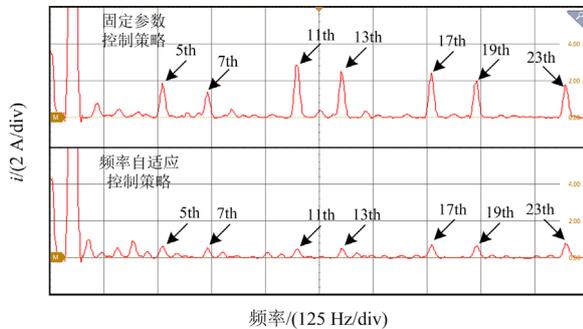


图 24 52 Hz 工况下两种控制策略电流谐波频谱图

Fig. 24 Current harmonic spectrum diagram of two control strategies under 52 Hz condition

略下各次谐波含量明显较大，其中低次谐波含量较少，验证了环路滤波对前置滤波检测性能的补偿。自适应控制策略治理后系统中 $6k \pm 1$ 谐波电流幅值较低，有效地解决了频率变化下的充电站电流谐波畸变的问题。此外，谐波电流的消除减小了耦合所产生的谐波电压，也将进一步提高充电站电压质量。

4 总结

针对有源电力滤波器对频率波动工况下充电站谐波补偿性能不足的问题，本文提出了一种频率自适应控制策略。通过前置滤波 TOGI-ROGI 与环路滤波 DSC 级联的混合滤波结构，并引入前馈补偿通道的改进锁相环，实现频率自适应谐波检测。基于检测算法输出的谐波特征和电网频率，通过 FAFRC 实现对谐波电流动态跟踪。仿真和实验结果表明，本文所提的控制策略可在 32 ms 实现对充电机谐波电流检测，具有更优的滤波能力和动态响应能力，对不同频率有更高的计算精度。在非额定频率下，具有较优的补偿能力，治理后谐波畸变率稳定在 5% 以下，且在三相不平衡和直流偏置的工况下依然能够稳定补偿，为充电站谐波治理提供方案。同时，该控制策略具有通用性，通过改变检测点的位置，可对不同场景产生的 $6k \pm 1$ 次谐波实现治理。

参考文献

- [1] 黄学良, 刘永东, 沈斐, 等. 电动汽车与电网互动: 综述与展望[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(7): 3-23.
HUANG Xueliang, LIU Yongdong, SHEN Fei, et al. Vehicle to grid: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 3-23.
- [2] 时珊珊, 魏新迟, 张宇, 等. 考虑多模式融合的光储充电站储能系统优化运行策略[J]. 中国电力, 2023, 56(3): 144-153, 161.
SHI Shanshan, WEI Xinchu, ZHANG Yu, et al. Optimal operation strategy of energy storage system in photovoltaic-storage charging station considering multi-mode integration[J]. Electric Power, 2023, 56(3): 144-153, 161.
- [3] 吴小汉, 张谦, 栗尧嘉, 等. 基于区块链的私有充电桩共享平台交易策略[J]. 发电技术, 2022, 43(3): 439-451.
WU Xiaohan, ZHANG Qian, SU Yaojia, et al. Sharing platform trading strategy of private charging pile based on blockchain[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 439-451.
- [4] 全慧, 李相俊, 张杨, 等. 快充电站多类型应用方式的并网影响及控制技术综述[J]. 中国电力, 2021, 54(1): 89-95, 103.
QUAN Hui, LI Xiangjun, ZHANG Yang, et al. A review

- of grid-connection impact and control technology of FCS multi-type application modes[J]. *Electric Power*, 2021, 54(1): 89-95, 103.
- [5] 孙可慧, 刘国鹏, 李少雄, 等. 基于实测数据的电动汽车充电站电能质量分析方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(2): 74-88.
SUN Kehui, LIU Guopeng, LI Shaoxiong, et al. Power quality analysis method of an electric vehicle charging station based on measured data[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(2): 74-88.
- [6] 胡泽春, 邵成成, 何方, 等. 电网与交通网耦合的设施规划与运行优化研究综述及展望[J]. *电力系统自动化*, 2022, 46(12): 3-19.
HU Zechun, SHAO Chengcheng, HE Fang, et al. Review and prospect of research on facility planning and optimal operation for coupled power and transportation networks[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2022, 46(12): 3-19.
- [7] 蔡海青, 代伟, 赵静怡, 等. 基于多参数规划的电动汽车充电站有效容量评估方法[J]. *中国电力*, 2022, 55(11): 175-183.
CAI Haiqing, DAI Wei, ZHAO Jingyi, et al. Available capacity evaluation method of electric vehicle charging stations based on multi-parametric programming[J]. *Electric Power*, 2022, 55(11): 175-183.
- [8] WANG L, QIN Z, SLANGEN T, et al. Grid impact of electric vehicle fast charging stations: trends, standards, issues and mitigation measure-an overview[J]. *IEEE Open Journal of Power Electronics*, 2021, 2: 56-74.
- [9] 车伟, 陈洁, 胡亚杰, 等. 光伏快速充电站配电变压器端电能质量综合控制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(21): 128-137.
HE Wei, CHEN Jie, HU Yajie, et al. Comprehensive control of power quality at the distribution transformer end of a photovoltaic fast charging station[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(21): 128-137.
- [10] 袁性忠, 王辉, 贾宏刚, 等. 基于储能型 APF 的微电网电能质量综合治理[J]. *高压电器*, 2022, 58(8): 238-244, 251.
YUAN Xingzhong, WANG Hui, JIA Honggang, et al. Comprehensive power quality control for microgrid based on apf with energy storage[J]. *High Voltage Apparatus*, 2022, 58(8): 238-244.
- [11] 马永翔, 权学红, 闫群民, 等. 基于 PI + QPR 控制的单相有源电力滤波器研究[J]. *电测与仪表*, 2023, 60(3): 165-171.
MA Yongxiang, QUAN Xuehong, YAN Qunmin, et al. Study on the single-phase active power filter based on PI + QPR control[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2023, 60(3): 165-171.
- [12] VERMA A, SINGH B. AFF-SOGI-DRC control of renewable energy based grid interactive charging station for EV with power quality improvement[J]. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2021, 57(1): 588-597.
- [13] ZHOU Y, ZANG T, ZHOU B, et al. Impacts of dynamic frequency feedback loop in SOGI-PLL on low-frequency oscillation in an electric railway system[J]. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2023, 9(3): 4080-4093.
- [14] ISSAM A, BAYAN H. DC offset rejection in a frequency-fixed second-order generalized integrator-based phase-locked loop for single-phase grid-connected applications[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(1): 1-13.
- [15] ZAMANI A R, GHADERI M H, HAMZEH M. Dynamic response and filtering capability improvement of $\alpha\beta$ -frame cascaded delayed signal cancellation based PLL[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2022, 37(2): 1156-1163.
- [16] GOLESTAN S, GUERRERO J M, VASQUEZ J C, et al. Advanced single-phase DSC-based PLLs[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(4): 3226-3238.
- [17] SEVILMIS F, KARACA H, AHMED H. High-order delayed signal cancellation-based PLL under harmonically distorted grid voltages[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2023, 72: 1-9.
- [18] 赵鑫涛, 裘智峰, 于晶荣, 等. 并联型有源滤波器精细化补偿方案[J]. *电网技术*, 2018, 42(4): 1290-1299.
ZHAO Xintao, QIU Zhifeng, YU Jingrong, et al. Research of refined compensation method on shunt active power filter[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(4): 1290-1299.
- [19] 张功, 赵强松, 陈赛男, 等. 单相并网逆变器新型奇次谐波重复控制策略[J]. *电力电子技术*, 2023, 57(9): 73-78.
ZHANG Gong, ZHAO Qiangsong, CHEN Sainan, et al. Novel odd-harmonic repetitive control scheme for single-phase grid-tied inverters[J]. *Power Electronics*, 2023, 57(9): 73-78.
- [20] LIU Z, ZHOU K, YANG Y, et al. Frequency-adaptive virtual variable sampling-based selective harmonic repetitive control of power inverters[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2021, 68(11): 11339-11347.
- [21] 陶顺, 要海江, 宋一丹, 等. 三相 Vienna 型充电机超高频谐波产生机理分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(5): 22-32.
TAO Shun, YAO Haihong, SONG Yidan, et al. Analysis of the generation mechanism of supraharmonics in a three-phase Vienna charger[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(5): 22-32.

- [22] TU H, FENG H, SRDIC S. Extreme fast charging of electric vehicles: a technology overview[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2019, 5(4): 861-878.
- [23] 陈奎, 马子龙, 沈兴来, 等. 基于充电方式的充电站多源谐波特性分析[J]. 智慧电力, 2019, 47(9): 73-80.
CHEN Kui, MA Zilong, SHEN Xinglai, et al. Analysis of Charging station multi-source harmonic characteristics based on charging mode[J]. Smart Power, 2019, 47(9): 73-80.
- [24] 胡畔, 吴斌, 陈红坤, 等. 计及时序特性的电动汽车快充充电站谐波分析[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3645-3655.
HU Pan, WU Bin, CHEN Hongkun, et al. Harmonic analysis of electrical vehicle fast-charging station considering sequence behavior of load[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3645-3655.
- [25] 金国彬, 谢飞, 李国庆, 等. 弱电网且谐波畸变背景下分布式电源并网系统谐振抑制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(5): 1-10.
JIN Guobin, XIE Fei, LI Guoqing, et al. Resonance suppression of a distributed power grid-connected system in a weak grid and with harmonic distortion background[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(5): 1-10.
- [26] ZHANG M, YUAN Y, SUN X, et al. Harmonic resonance suppression strategy of the front-end Vienna rectifier in EV charging piles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(1): 1036-1053.
- [27] 张敏, 孙孝峰, 朱艳萍, 等. 驻波移相有源电力滤波器在环形配电网中的应用[J/OL]. 电工技术学报: 1-15 [2024-03-14]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231935>.
ZHANG Min, SUN Xiaofeng, ZHU Yanping, et al. Applications of standing wave phase shifting active power filters in closed-loop distribution power systems[J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society: 1-15 [2024-03-14]. <https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231935>
- [28] 崔朋玉, 孙孝峰, 沈虹, 等. 适用于光伏并网系统的传输电缆线性化模型研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(1): 21-29.
CUI Pengyu, SUN Xiaofeng, SHEN Hong, et al. Linearization modeling of transmission cable for analysis of PV grid tied inversion system[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2021, 42(1): 21-29.
- [29] 聂程, 王跃, 雷万钧, 等. 新能源并网输电电缆谐波谐振分析及抑制方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(17): 128-133.
NIE Cheng, WANG Yue, LEI Wanjuan, et al. Harmonic resonance analysis and suppression method for transmission cables between renewable energy sources and power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(17): 128-133.
- [30] 张华赢, 胡子珩, 李艳, 等. 不平衡电网下的改进型锁相环设计研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(2): 196-200.
ZHANG Huaying, HU Ziheng, LI Yan, et al. Design of the improved phase locked loop under unbalanced grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(2): 196-200.

收稿日期: 2024-04-22; 修回日期: 2024-07-25

作者简介:

徐先峰(1982—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为交通能源融合、无线充电和智能电网等; E-mail: xxf_chd@163.com

马文昊(1999—), 男, 硕士研究生, 研究方向为充电站电能质量治理; E-mail: 2022132002@chd.edu.cn

卢勇(1989—), 男, 通信作者, 博士, 讲师, 研究方向为电能质量治理、新能源并网和逆变器建模与控制等。

E-mail: luyong@chd.edu.cn

(编辑 张颖)