

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.09.018

基于延时补偿的电网谐波电流信号 跟踪控制方法研究

庄建煌¹, 陈永华², 黄少敏³, 王普专³

(1. 国网福建省电力有限公司 莆田供电公司, 福建 莆田 351100; 2. 国网福建省电力有限公司 三明供电公司, 福建 三明 365000; 3. 国网福建省电力公司技能培训中心, 福建 泉州 362000)

摘要:针对电力系统中谐波污染严重等问题,以注入式混合的有源电力滤波器 IHAPF 作为研究对象,提出了基于延时补偿的谐波电流信号跟踪控制方法。该方法主要由 π 补偿 Smith 预估器与神经网络 PI 控制组成, π 补偿 Smith 预估器使系统延时过程中从控制的闭环内部转换到外部,从而减小了控制延时对系统的影响;通过 PSO-BP 算法对 PI 控制器参数进行优化处理,最后对所提方法进行了仿真验证。仿真结果表明,与传统方法相比,本研究所提方法具有更好动态响应特性和更高的稳态补偿精度。

关键词:谐波电流;延时补偿; π 补偿预估器;动态响应

中图分类号:TM714.3

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)09-1125-05

Tracking control method of power network harmonic current signal based on time delay compensation

ZUANG Jian-huang¹, CHEN Yong-hua², HUANG Shao-min³, WANG Pu-zhuan³

(1. Putian power supply company of State Grid Fujian Electric Power Co, Ltd, Pu Tian 351100, China;
2. Sanming power supply company of State Grid Fujian Electric Power Co, Ltd, San Ming 365000, China;
3. Skills Training Center of State Grid Fujian Electric Power Co, Ltd, Quan Zhou 362000, China)

Abstract: Aiming at the serious harmonic pollution in power system, an active power filter based on IHAPF was used as the research object, and the tracking control method of harmonic current signal based on time delay compensation was proposed. The method was mainly composed of compensation Smith predictor with π and neural network PI control. In delay of Smith predictor with π compensation system from controlling the closed loop of internal conversion to the outside, so as to reduce the impact of time delay on system. The parameters of PI controller were optimized by PSO-BP algorithm. The ITAE criterion to establish Smith predictor and PI control parameter the mathematical expression, and neural network optimization method for the optimal parameters of the two controllers. Finally, the method was presented in this paper was simulation, the simulation results show that compared with the traditional method has better dynamic response characteristics of steady-state compensation and higher precision.

Key words: harmonic current; delay time compensation; π compensation predictor; dynamic response

0 引言

随着电力电子设备在配电网中广泛使用,企业配电网中的谐波污染问题日益严重,每年给企业经

济造成了巨大损失。而无源滤波器只能对各次谐波进行滤除,且易与电网产生谐振,已不能满足对谐波抑制的要求^[1-3]。有源滤波器也是抑制谐波的一种重要手段,其原理是从需要补偿的目标中寻找谐波

波电流,再由补偿设备生成一个与该谐波大小相等而极性反相的补偿电流与谐波电流相互抵消^[4]。有源滤波器能够对各次谐波进行动态补偿,且响应周期短,从而在电网谐波滤除中得到广泛应用。但有源滤波器也存在容量小、结构复杂以及使用成本过高等缺点,为此很少单独在配电网中使用。因此,通常情况下使用有源电力滤波器与无源电力滤波器相结合组成混合型有源电力滤波器,从而实现谐波滤除的目的^[5-7]。

在有源电力滤波器中对电流精确跟踪控制直接影响了滤波器整体性能,而评价系统性能的两个指标是系统响应速度和稳态补偿精度,针对提高滤波器性能广大学者提出了众多方法。目前有源滤波设备多采用数字化的控制器,实现比较灵活,但存在延时现象,对滤波器性能造成了严重影响,对于混合型有源滤波器由于其结构特殊,延时对其影响相比于单独的有源滤波器更为严重。Smith 预估控制随着计算机的不断发展,已经成为解决工业延时滞后的有效方法之一,smith 预估计具有对设定值的改变响应速度快,跟踪精度高等优点。但是,Smith 预估器对被控对象的数学模型要求较高,这一点在工程应用中比较难实现,此外传统的 Smith 预估器受到参数的限制无法使系统趋于稳定^[8-10]。

本研究以注入式混合的有源电力滤波器(injection hybrid active power filter, IHAPF)作为研究对象,因控制延时能够对系统产生影响,故将电网中谐波电流转变为谐波电压信号,提出基于延时补偿的谐波电流信号跟踪控制方法。该方法主要由 π 补偿 Smith 预估器与神经网络 PI 控制组成。 π 补偿 Smith 预估器使系统延时过程中从控制的闭环内部转换到外部,从而减小控制延时对系统的影响。通过 PSO-BP 算法对 PI 控制器参数进行优化处理。由 ITAE 准则建立 Smith 预估器与 PI 控制参数之间的数学表达式,由此关系和神经网络优化的方法得到两种控制器的最优参数。最后笔者对本研究提出的方法进行仿真验证。

1 IHAPF 结构与谐波电压信号控制

IHAPF 结构如图 1 所示。它主要由无功补偿电容器、基波谐振支路、电压型逆变器、不可控整流电路等组成。

IHAPF 的谐波单相等效电路如图 2 所示。

为了对图 2 中的谐波电流进行滤除,可将逆变器中的输出电流 i_c 控制为:

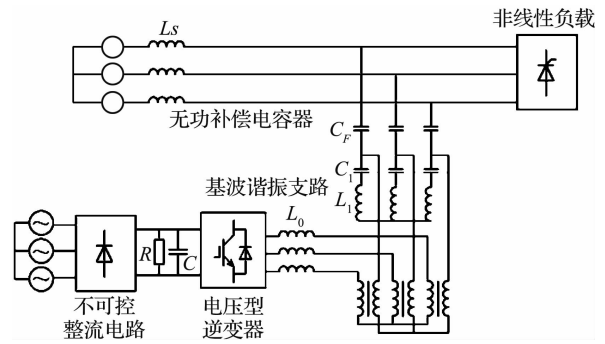


图 1 IHAPF 结构图

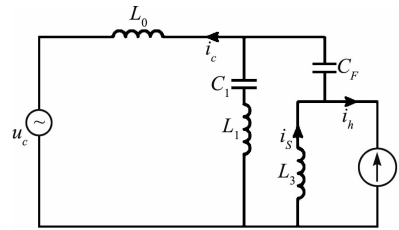


图 2 IHAPF 的谐波单相等效电路

负载被看作谐波电流源 i_h ; u_c ; i_c —逆变器的输出电压与输入电流; i_s —电网中谐波电流

$$i_c = -i_h \quad (1)$$

则有:

$$i_s = 0 \quad (2)$$

传统的电流控制方法如图 3 所示。

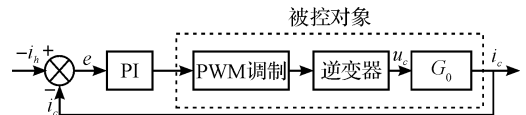


图 3 传统的电流控制方法

G_0 — i_c 与 u_c 之间的传递函数,控制器采用

传统的 PI 控制方法进行控制

由图 2,传递函数 G_0 可表示为:

$$G_0 = \frac{i_c}{u_c} = \left(sL_0 + \frac{\left(\frac{1}{sC_F} + sL_s \right) \left(\frac{1}{sC_1} + sL_1 \right)}{\frac{1}{sC_F} + sL_s + \frac{1}{sC_1} + sL_1} \right) \quad (3)$$

结合式(1 ~ 3)可得:

$$\begin{aligned} u_h &= \frac{i_h}{G_0} \\ u_c &= -u_h \end{aligned} \quad (4)$$

式中: u_h —负载的谐波电流 i_h 经过传递函数 $1/G_0$ 输出的电压信号—谐波电压信号。

由于传递函数 G_0 阶数较高,在极点配置上比较难实现,本研究结合将(4)式谐波电压信号作为控制目标,并考虑到 IHAPF 系统中存在延时现象从而影响了电流跟踪控制,则实际的电压信号跟踪控制框图如图 4 所示。

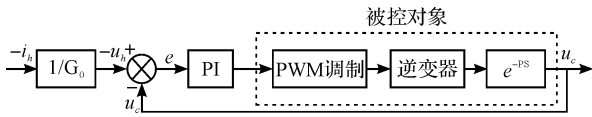


图4 改进后的控制框图

图4中, u_c 、 $-u_h$ 之间的传递函数为:

$$\frac{u_c}{-u_h} = \frac{G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c(s)G_p(s)e^{-\tau s}} \quad (5)$$

式中: τ —IHAPF 系统的控制延时, $G_c(s)$ —传递函数, $G_p(s)$ —电压型逆变器的传递函数。

由式(5)可以看出,在方程中包含了延时项,此延时项会对系统的稳定性与控制性能造成影响。

2 改进型 smith 预估器的电流跟踪控制

本研究针对延时对 IHAPF 系统的控制能够产生影响,提出了一种基于改进的 Smith 预估器电流补偿方案。

控制框图如图5所示。

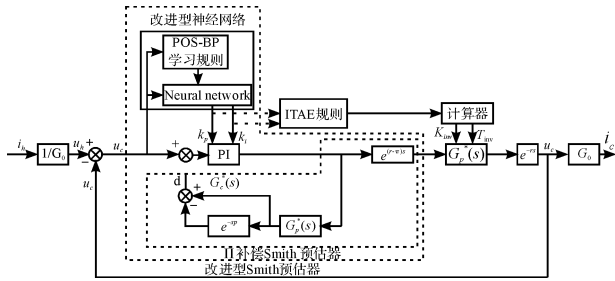


图5 改进型 smith 预估器电流跟踪控制框图

改进的 Smith 预估器主要由神经网络对参数进行优化的 PI 控制器与一个 π 补偿 Smith 预估器组成。

由图5可以得到如下关系式:

$$\begin{cases} u_e = u_h - u_c \\ (u_e - d)G_c^*(s) = u \\ uG_p^*(s)(1 - e^{-\pi s}) = d \\ u e^{(\tau-\pi)s} G_p^*(s) e^{-\tau s} = u_c \end{cases} \quad (6)$$

综合式(6),可以简化得:

$$\begin{cases} [u_h - u_c - uG_p^*(s)(1 - e^{-\pi s})]G_c^*(s) = u \\ u = u_c e^{\pi s} (G_p^*(s))^{-1} \end{cases} \quad (7)$$

由上式可得:

$$u_h G_c^*(s) = u_c e^{\pi s} (G_p^*(s))^{-1} + u_c e^{\pi s} G_c^*(s) \quad (8)$$

从而可得逆变器的输出电压 u_c 与参考电压信号 u_h 两者之间的传递函数为:

$$\frac{u_c}{u_h} = \frac{G_c^*(s)G_p^*(s)e^{-\tau s}}{1 + G_c^*(s)G_p^*(s)} \quad (9)$$

由上式可以看出,在特征方程中没有了延时这一项,说明该系统能够有效的消除延时对系统造成的不

良影响。此外在方程中有 $e^{-\pi s}$, 表明 u_c 比 u_h 滞后了 π , 从而与谐波电压信号大小相等、极性相反,起到了式(4)的控制效果。由式(9)可以得到:等效图5的电压信号控制框图如图6所示。

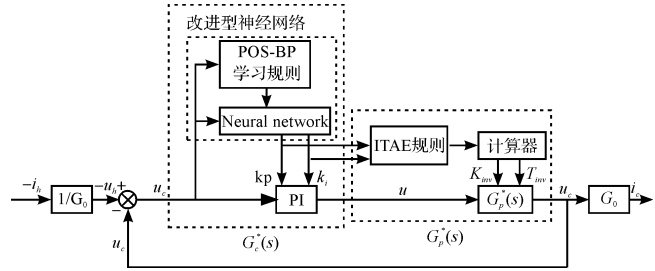


图6 等效图5的电压信号控制框图

2.1 改进的 PSO-BP 神经网络权值学习算法

神经网络示意图如图7所示。

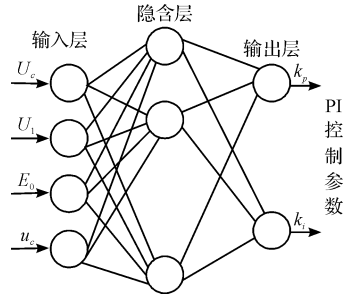


图7 神经网络示意图

根据 IHAPF 的具体运行状态,选择神经网络的输入层神经元个数为 $P = 4$;输出层神经元数目 $M = 2$ 。

网络的输入层输入为:

$$x_j^{(1)}(t) = x_j(j = 1, 2, 3, 4) \quad (10)$$

对应于 IHAPF 系统中的电压给定值 U_c , 电容电压的实际值为 U_1 , 两者之间的差值 E_0 与谐波电压信号差值 u_e 网络隐含层的输入以及输出为:

$$\begin{aligned} net_i^{(2)}(t) &= \sum_{j=1}^4 w_{ij}^{(2)} x_j^{(1)}(t), O_i^{(2)}(t) \\ &= f(net_i^{(2)}(t)) (i = 1, 2, \dots, Q) \end{aligned} \quad (11)$$

式中: w_{ij} —连接权值, $f(\cdot)$ —激励函数。

$$f(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad (12)$$

网络输出层的输入以及输出为:

$$\begin{aligned} net_l^{(3)}(t) &= \sum_{i=1}^Q w_{li}^{(3)} O_i^{(2)}(t), O_l^{(3)}(t) \\ &= g(net_l^{(3)}(t)) (l = 1, 2) \end{aligned} \quad (13)$$

$$O_l^{(3)}(t) = k_p, O_2^{(3)}(t) = k_i \quad (14)$$

其中,输出层以及输出节点分别对应 PI 控制器中的参数 k_p 、 k_i 。

神经网络性能指标假设为:

$$J(t) = 0.5(u_e)^2 = 0.5[u_h - u_c]^2 \quad (15)$$

本研究通过传统的 BP 算法与粒子算法上对网络权值调整进行了改进。网络权值的修正量为:

$$\Delta w_{li}(t) = (w - 1)(w_{li}(t) - w_{li}(t-1)) + r_1 c_1 (w_{li}(b) - w_{li}(t)) + r_2 c_2 (w_{li}(B) - w_{li}(t)) \quad (16)$$

$$\Delta w_{ij}(t) = (w - 1)(w_{ij}(t) - w_{ij}(t-1)) + r'_1 c'_1 (w_{ij}(b) - w_{ij}(t)) + r'_2 c'_2 (w_{ij}(B) - w_{ij}(t)) \quad (17)$$

式中: w — 惯性系数; c_1, c_2, c'_1, c'_2 — 加速度权重; r_1, r_2, r'_1, r'_2 — $0 \sim 1$ 的随机数。

在传统 BP 算法基础上结合式(16,17), 可得到 PSO-BP 权值修正算法:

$$w_{li}^{(3)}(t+1) = w_{li}^{(3)}(t) + \beta \delta_l^{(3)} O_i^{(2)} + (w - 1)(w_{li}^{(3)}(t) - w_{li}^{(3)}(t-1)) + r_1 c_1 (w_{li}(b) - w_{li}(t)) + r_2 c_2 (w_{li}(B) - w_{li}(t)) \quad (18)$$

其中:

$$\delta_l^{(3)} = -u_e(t) \operatorname{sgn}\left(\frac{\partial(u_c)}{\partial(u_l)}\right) \frac{\partial u(t)}{\partial O_l^{(3)}(t)} g'(net_l^{(3)}(t))$$

$$w_{ij}^{(2)}(t+1) = w_{ij}^{(2)}(t) + \beta \delta_i^{(2)} x_j^1(t) + (w - 1)(w_{ij}^{(2)}(t) - w_{ij}^{(2)}(t-1)) + r'_1 c'_1 (w_{ij}(b) - w_{ij}(t)) + r'_2 c'_2 (w_{ij}(B) - w_{ij}(t)) \quad (19)$$

$$\text{其中: } \delta_i^{(2)} = f'(net_i^{(2)}(t)) \sum_{l=1}^2 \delta_l^{(3)} w_{li}^{(3)}(t)。$$

2.2 π 补偿 Smith 预估器参数的辨识

在图 6 中 π 补偿 Smith 预估器参数是不可知的, 本研究利用 ITAE 准则建立 π 补偿 Smith 预估器参数与 PI 控制器参数之间的关系表达式, 从而实现参数的有效辨识。在文献[11] 中比较准确地对逆变器进行建模, 并建立了如下表达式:

$$G_p(s) = \frac{k_{inv}}{T_{inv}s + 1} \quad (20)$$

式中: k_{inv} — 传递函数的过程增益常数, T_{inv} — 惯性常数。

因 IHAPF 的延时性, 则被控对象的传递函数为:

$$G_p(s) = \frac{k_{inv}}{T_{inv}s + 1} e^{-rs} \quad (21)$$

设:

$$G_c(s) = k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s}\right) \quad (22)$$

式中: k_p — 控制器增益, T_i — 控制器积分时间。

将式(20,22) 代入到式(9) 中可得:

$$s^2 + \frac{k_p k_{inv} + 1}{T_{inv}} s + \frac{k_p k_{inv}}{T_i T_{inv}} = 0 \quad (22)$$

以 ITAE 为准则的二阶最佳极点方程为:

$$s^2 + 2w_n \xi s + w_n^2 = 0 \quad (23)$$

式中: w_n — 无阻尼振荡的频率, ξ — 阻尼比。

其中, w_n 为:

$$w_n = \frac{1 + 1.5\xi + \xi^2}{t_r} \quad (24)$$

通过对比式(22) 与式(23), 可以得到逆变器的传递函数和 PI 控制器中参数之间的数学表达式:

$$k_{inv} = \frac{1}{k_p} \left(\frac{2w_n \xi}{2w_n \xi - w_n^2 T_i} - 1 \right) \quad (24)$$

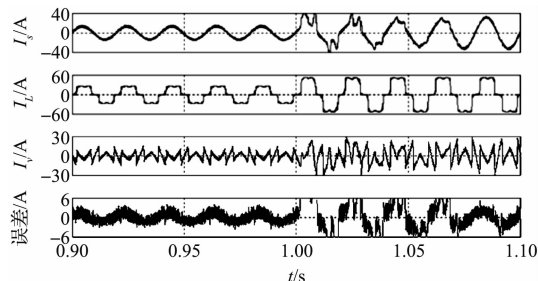
$$T_{inv} = \frac{1}{2w_n \xi - w_n^2 T_i} \quad (25)$$

通过式(24)、式(25) 可以得到电压型逆变器的具体参数大小, 从而实现 Smith 预估器模型的辨识。

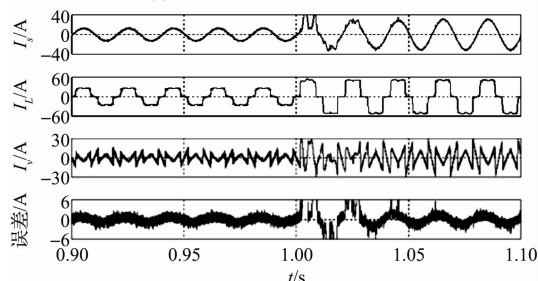
3 仿真分析

为了验证本研究所提方法的有效性, 将本研究的方法应用到 IHAPF 系统中并进行了仿真分析, 并将本研究所提算法与传统 PI 算法进行仿真对比。仿真参数为: 电源电压为 AC380 V/50 Hz; 等效电感 $L_s = 1$ mH; 注入电容 $C_F = 100$ μ F; 基波支路的电感 $L_1 = 40$ mH, 电容 $C_1 = 249$ μ F, 品质因数 $Q = 50$; 输出滤波电感 $L_0 = 0.5$ mH, 输出滤波电容 $C_0 = 24.1$ μ F, 等效电阻 $R_0 = 0.09$ Ω 。PSO-BP 算法中的参数为: 加权因子 $w = 0.4$, $c = 0.03$, $L = 0.03$, $c_1 = c_2 = 2$, $c'_1 = c'_2 = 1.4$ 。

负载发生变化时采用不同方法下电流仿真波形如图 8 所示。



(a) 传统PI控制算法下补偿仿真



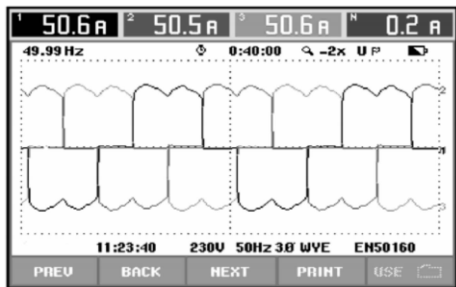
(b) 本研究算法下补偿仿真

图 8 负载变化时电流波形仿真结果

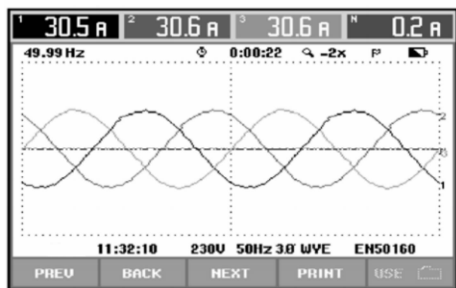
从图 8 中可以看出, 在 1 s 时负载发生变化, 传统

的 PI 控制方法下电流经过 3.5 个时间周期才能慢慢地趋于稳定。而采用本研究的方法下仅需要 1.5 个时间周期电流波形便能趋于稳定。

为了进一步证明本研究所提算法的有效性,笔者进行了相关实验研究。采用本研究算法对电流补偿前后的电流波形图如图 9 所示。



(a) 未采用红本研究算法的电流波形



(b) 采用红本研究算法补偿后的电流波形

图 9 补偿前后的电流波形图

由图可以看出,治理后的波形相比治理之前有了很大提高,波形几乎接近于正弦波形。

4 结束语

由于控制系统的延时特点能够对系统整体性能造成不利影响,本研究提出了一种新的电流补偿方法,以消除系统时间滞后问题。该方法主要由 π 补偿 Smith 预估器与神经网络 PI 控制组成。 π 补偿 Smith 预估器使系统延时过程中从控制的闭环内部转换到外部,从而减小控制延时对系统的影响。通过 PSO-BP 算法对 PI 控制器参数进行优化处理。由 ITAE 准则建立 smith 预估器与 PI 控制参数之间的数学表达式,由此关系和神经网络优化的方法得到两种控制器的最优参数。

最后的仿真与实验结果表明,本研究提出的电流补偿控制方法是正确的和有效的。

参考文献 (References):

- [1] RAHMAN S, Al HADDAD K, KANAAN H Y. A comparative study of shunt hybrid and shunt active power filters for single-phase applications: simulation and experimental validation[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2006, 71(4):345-359.
- [2] WAJIHA SHIREEN, LI TAO. A DSP-based active power filter for low voltage distribution systems[J]. *Electric Power Systems Research*, 2008, 78(9):1561-1567.
- [3] YANG Hua-yun, REN Shi-yan. A practical series shunt hybrid active power filter based on fundamental magnetic potential self-balance[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2008, 23(4):2089-2096.
- [4] 刘 聪,戴 珂,张树全,等. RDFT 算法在有源电力滤波器中的应用[J]. *电力自动化设备*, 2011, 31(7):96-100.
- [5] LUO An, SHUAI Zhi-kang, ZHU Wen-ji, et al. Combined system for harmonic suppression and reactive power compensation[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2009, 56(2):418-427.
- [6] 张树全,戴 珂,谢 斌,等. 多同步旋转坐标系下指定次谐波控制[J]. *中国电机工程学报*, 2010, 30(3):55-62.
- [7] 赵文强,陈国柱. 并联型 APF 在容性非线性负载中的应用[J]. *电力自动化设备*, 2009, 29(12):59-64.
- [8] ASTROM K J, HANG C C, LIM B C. A new smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time[J]. *IEEE Transactions Automatic Control*, 1994, 39(2):343-345.
- [9] 范瑞祥,罗 安,唐 杰. 谐振注入式有源滤波器数字化控制系统延时研究[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(13):104-110.
- [10] GUPTA N, SINGH S P, DUBEY S P. Neural Network Based Shunt Active Filter for Harmonic and Reactive Power Compensation under Non-ideal Mains Voltage[C]//5th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications. Taichung, IEEE, 2010:370-375.
- [11] 夏向阳,罗 安,范瑞祥,等. 有源滤波器控制延时的新型补偿方法. *电工技术学报*, 2008, 23(11):166-172.

[编辑:张 豪]

本文引用格式:

庄建煌,陈永华,黄少敏,等. 基于延时补偿的电网谐波电流信号跟踪控制方法研究[J]. *机电工程*, 2016, 33(9):1125-1129.

ZUANG Jian-huang, CHEN Yong-hua, HUANG shao-min, et al. Tracking control method of power network harmonic current signal based on time delay compensation[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(9):1125-1129.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>