

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.05.025

基于双同步坐标系的解耦锁相环 在并联型 APF 中的应用

姚成泽¹, 张有兵¹, 谢路耀¹, 黄鹃敏¹, 郑 谔²

(1. 浙江工业大学 信息工程学院, 浙江 杭州 310023; 2. 中船重工第七一五研究所, 浙江 杭州 310023)

摘要:针对电力系统中的电能质量问题和有源滤波器的锁相环节的准确性对滤波效果的影响,在对谐波和无功产生的原因进行分析的基础上,对有源滤波器(APF)改善电能质量的有效性进行了阐述。在电网电压平衡和不平衡、频率变化等各种环境下,在仿真平台 Matlab/Simulink 上对两种软件锁相环(SPLL)的锁相跟踪能力进行了比较。根据仿真结果,提出了将鲁棒性更好的基于双同步坐标系的解耦软件锁相环代替传统锁相环,并应用在有源滤波器中。研制了一台基于 TMS320F28335 DSP 的有源滤波器样机,分别在电网电压平衡、不平衡以及负载突变等情况下进行了一系列实验,观察了 APF 样机在不同工况下的滤波效果。实验结果表明,应用了该锁相技术的有源滤波器具有较好的滤波效果和较强的电网环境适应性。

关键词:电力系统谐波;有源滤波器;DDSRF-SPLL;TMS320F28335

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)05-0712-05

Application of decoupled double synchronous reference frame PLL on shunt active power filter

YAO Cheng-ze¹, ZHANG You-bing¹, XIE Lu-yao¹, Huang Juan-min¹, ZHENG Xu²

(1. College of Information and Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310023, China;

2. 715th Research Institute of China Ship Building Industry Corporation, Hangzhou 310023, China)

Abstract: Aiming at power quality problem of power system and the influence of compensating efficiency caused by the accuracy of phase-locked loop (PLL) on APF, the efficiency of (APF) for eliminating harmonic current and compensating reactive power was analyzed according to the mechanism of harmonic current problem and reactive power problem in power system. Two software PLL (SPLL)s were compared on Matlab/Simulink simulation platform, their ability of lock and trace phase being tested under kinds of electric environment such as balanced voltage and unbalanced voltage and frequency change. Based on the results of simulation, the (DDSRF-SPLL) was proposed to be applied to APF because of its robustness. An APF prototype based on TMS320F28335 DSP was designed for experiment under the situation of balanced voltage and unbalanced voltage and load change. The results indicate that the APF with this PLL technique has good compensating performance and environment adaptability.

Key words: power system harmonic; active power filter (APF); decoupled double synchronous reference frame-SPLL (DDSRF-SPLL); TMS320F28335

0 引 言

大量电力电子装置的使用在积极影响人们的生活

的同时也对电力系统注入了大量的谐波和无功功率,对电网的供电质量提出了严峻的考验,因此消除电网的谐波一直是业界研究的热点^[1-4]。

收稿日期:2014-12-11

作者简介:姚成泽(1990-),男,江西上饶人,主要从事电能品质优化方面的研究。E-mail:yaochengze110@163.com

通信联系人:张有兵,男,教授,博士生导师。E-mail:youbingzhang@zjut.edu.cn

谐波的治理方法主要有无源滤波和有源滤波,无源滤波虽然造价较有源滤波低,但是只能滤除特定频率的谐波,滤波带宽小,且易造成电网谐振,因此不太适合负载情况复杂、对电能品质要求高的场所。有源滤波器(APF)的概念最早在1976年被提出,对有源滤波器的研究取得了丰硕的成果^[5-6]。有源滤波器作为谐波被动治理的重要手段,能将电网谐波的总谐波畸变率控制在很低的水平。加上大功率半导体器件性能的不断提升,高速数字处理芯片(DSP)的运算能力不断加强,器件价格的不断下降,APF将成为未来谐波补偿的一个主流方式。

本研究搭建一个实验平台,通过三相整流器产生电网中较为典型的谐波环境,设计并研制一台基于双同步坐标系解耦锁相环的三相三线制并联型有源滤波器样机。

1 APF 基本原理

1.1 有源滤波器的基本原理

并联型有源滤波器的基本原理^[7]是:通过电流电压互感器采集电网与负载的电流信息,经过调理电路的信号处理送入 DSP,运用瞬时功率理论进行运算得到谐波电流指令值,该指令经过电流跟踪控制,会输出一组 PWM 脉冲波,输入给驱动电路,控制开关管(IGBT)的通断,从而可以通过主电路输出理想的补偿谐波电流,用以抵消电网中的电流谐波。若以 i_s 表示系统电流, i_L 表示负载电流(负载电流 i_L 包括基波电流 i_{Lf} 和谐波电流 i_{Lh} , i_{Lf} 又包括基波有功电流 i_{Lfp} 和基波无功电流 i_{Lfq}), i_c 表示 APF 输出的补偿电流,则它们之间的关系为:

$$i_s = i_L - i_c = i_{Lfp} + i_{Lfq} + i_{Lh} - i_c \quad (1)$$

当补偿电流 $i_c = i_{Lfq} + i_{Lh}$ 时,代入式(1),可得:

$$i_s = i_{Lfp} \quad (2)$$

即系统电流为波形是正弦的负载基波有功电流。

1.2 瞬时功率理论

瞬时功率理论是将 abc 坐标系下的电压矢量 e 和电流矢量 i 绘制在 $\alpha-\beta$ 坐标系(两相静止坐标系)下,并定义瞬时有功功率 p 为 e 与 i 的内积,瞬时无功功率 q 为 e 与 i 的叉积,于是有:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_\alpha & e_\beta \\ e_\beta & -e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

式(3)即为瞬时功率理论的基本方程。

瞬时功率理论从1982年被提出到发展至今,已经相当成熟,国内外关于该理论的论文文献也很多。因

此,本研究将不对该理论进行深入的阐述,详细的内容可参见参考文献[8-10]。

1.3 谐波跟踪算法

谐波跟踪算法分为直接电流控制和间接电压控制。本研究采用的是一种电压前馈加 P 控制器与电压空间矢量控制(SVPWM)相结合的跟踪算法,它属于间接电压控制,具体原理分析如下。

以三相三线制 APF 的 A 相为例,在忽略传输线阻抗及逆变器内阻的情况下,有:

$$L \frac{di_{ca}}{dt} = u_a - e_a \quad (4)$$

式中: u_a —逆变器输出的 A 相电压, e_a —A 相电网电压, i_{ca} —APF 输出的 A 相电流。电压前馈加 P 控制器的控制方程为:

$$u_a = e_a + k(i_{ca}^* - i_{ca}) \quad (5)$$

式中: i_{ca}^* —指令电流, k —P 控制器比例系数。联立式(4,5)可得:

$$k(i_{ca}^* - i_{ca}) = L \frac{di_{ca}}{dt} \quad (6)$$

分析式(6)可知,当 $i_{ca} < i_{ca}^*$ 时, $di_{ca}/dt > 0$, 使得 i_{ca} 增大,当 $i_{ca} > i_{ca}^*$ 时, $di_{ca}/dt < 0$, 使得 i_{ca} 减小,从而实现电流跟踪控制。

2 方案设计

APF 的性能好坏很大程度上取决于谐波检测环节的检测精度,而一个相位检测准确、鲁棒性好的锁相环是保证谐波检测精度的必要条件^[13]。因此,本研究将搭建的 Matlab/Simulink 仿真系统如图1所示,通过仿真比较选择合适的锁相环应用于 APF 中,验证 APF 在不同工况下的滤波效果。

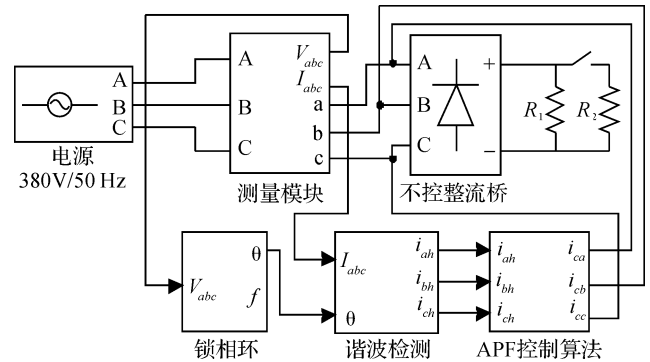


图1 APF 仿真系统

图1所示系统包括三相可调电源、电压电流测量模块、三相不可控整流桥负载(直流侧为电阻 R_1 和一个可通过开关并入主电路的电阻 R_2 , 设置两组负载是

为了仿真负载突变的情况)、锁相环(输入三相电压,输出频率 f 和相位角 θ)、谐波检测(输入系统侧三相电流,经坐标变换和低通滤波输出各相电流的谐波分量)以及 APF 控制算法模块(包含 SVPWM 算法模块和 APF 的输出主电路,输入各相谐波电流,输出各相补偿电流)。

2.1 锁相环比较仿真

现比较两种常用的软件锁相环:单同步坐标软件锁相环(SSRF-SPLL)和基于双坐标系的解耦软件锁相环(DDSRF-SPLL)。

SSRF-SPLL 采用单一的同步坐标系锁相控制结构。当电网电压平衡时,电网电压只存在正序分量,此时的电网实际电压 e 在 dq 同步坐标系中正好与 d 轴重合,而当锁相环准确锁相时,应有 $\hat{\theta} = \theta$,即锁相环的输出电压矢量 e_{PLL} 的 q 轴分量应为0,故可以通过对锁相环的输出 v_q 分量进行闭环 PI 控制,这样 e 与 e_{PLL} 便完全重合,实现了锁相功能。

DDSRF-SPLL 采用了基于正、负序双同步坐标系的 SPLL 系统结构。采用正、负序解耦算法,将 e_{PLL} 分解成在以角速度 $\hat{\omega}$ 逆时针旋转的 dq^+ 坐标系内的 e^+ 分量和在以角速度 $-\hat{\omega}$ 顺时针旋转的 dq^- 坐标系内的 e^- 分量,然后对 e_{PLL} 在 dq^+ 坐标系中的 q 轴分量进行闭环 PI 实现锁相功能。更详细锁相原理请参见参考文献[11-12]。

首先,电网电压平衡时,本研究比较这两种技术的锁相能力。利用三相可调电源,将电压源设置为:0~0.05 s内,电压为理想电压,线电压有效值为380 V,频率为50 Hz,在0.05 s~0.1 s内加入15%的5次和10%的7次谐波电压,在0.15 s~0.2 s内频率下降10 Hz,变为40 Hz,0.25 s后电压恢复为线电压380 V,频率50 Hz的理想电压。

仿真结果如图2所示。从图2中可以看出,在三相电压平衡的情况下,无论是电压畸变还是频率变化,两种锁相环都能迅速地锁定频率相位,结果比较满意。

再看电网电压不平衡时二者的比较。通过利用可调电源让 B 相和 C 相的电压幅值均下降20%,使得三相不平衡。三相不平衡时的两种锁相环的相位输出和频率输出如图3所示。由图3可知,SSRF-SPLL在三相不平衡时输出频率不准确。

综上,在电网电压平衡的情况下,本研究所列的两种锁相环都可以很好地工作,但是在电网电压出现不平衡时,SSRF-SPLL的性能将会大打折扣,而DDSRF-SPLL的性能则基本不受影响,仍能正常工作。因

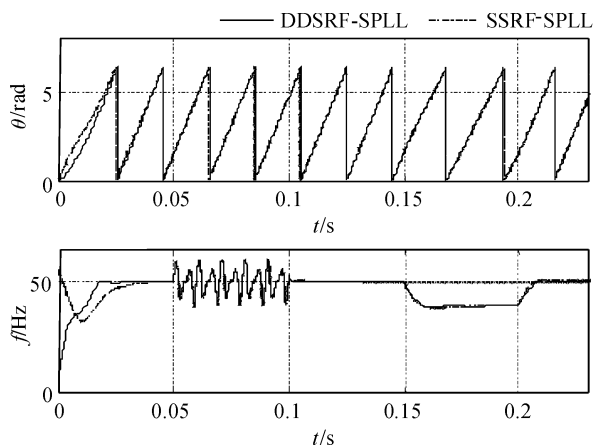


图2 三相平衡时两种锁相环输出

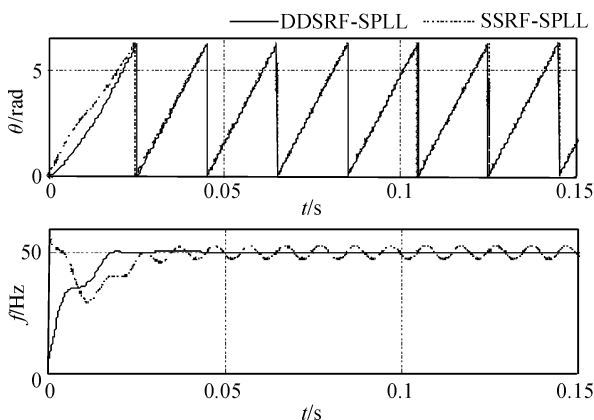


图3 三相不平衡时两种锁相环输出

此,本研究选择 DDSRF-SPLL 作为 APF 的锁相环。

2.2 不同负载情况的系统仿真

2.2.1 三相负载对称情况

三相电源相电压设置为380 V/50 Hz,整流桥直流侧负载电阻 R_L 为20 Ω ,三相负载对称。仿真运行, A 相电流波形如图4所示,图中APF在0.15 s开始投入。由图4可以看出,系统电流在APF投入前含有较大的谐波,波形畸变严重,而APF投入之后,经过短暂的过渡,电流波形呈正弦化,经FFT分析,电流谐波总

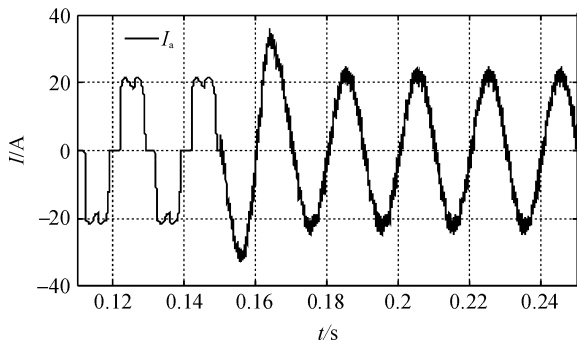


图4 三相对称负载下 A 相电流波形

I_a — A 相系统电流

畸变率由原来的 27.7% 变为 4.5%。

2.2.2 负载突变的情况

其他设置与三相对称负载时一致,仅在 0.25 s 时在整流桥的直流侧再投入一个阻值为 30 Ω 的电阻 R_2 ,以增大负载电流。仿真波形如图 5 所示。在 APF 投入运行稳定后,0.25 s 投入第二组负载,APF 能迅速地做出反应,使系统电流能够平滑的从原来的正弦波变为幅值更大的正弦波。电流总谐波畸变率在 APF 投入运行前是 27.7%,APF 投入后,0.25 s 前是 4.5%,0.25 s 后是 4.2%,可以看出,APF 投入后,对于负载突变的情况,其滤波效果仍然很不错。

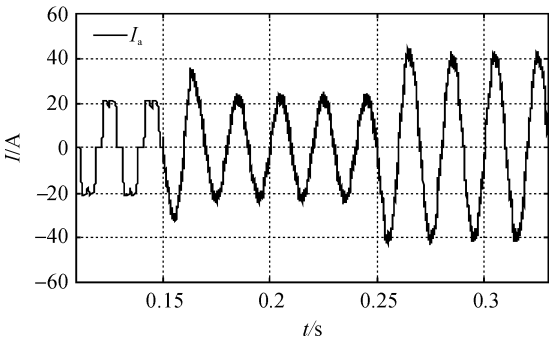


图5 负载突变时 A 相电流波形

2.2.3 三相不平衡的情况

在其他设置与 2.2.1 节一致的情况下,本研究调节可调电源,让 A 相电压幅值下降为原来的 80%,这样三相负载电流将不再对称。仿真波形如图 6 所示,由于三相电压不再是平衡电压,三相电流是非对称的。APF 投入后,经过短暂的缓冲时间,波形趋于正弦化,经 FFT 分析,A 相的谐波总畸变率由原来的 26.5% 变为 4.4%。

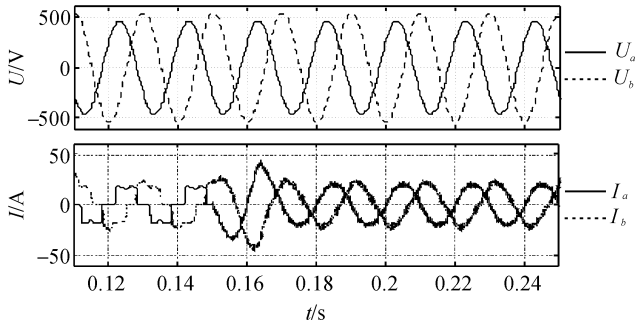


图6 三相不平衡时 AB 两相电压电流波形

3 实验结果及分析

根据以上仿真分析,笔者研究设计了一台 APF 样机,采用 TI 公司的高速 DSP:STM320F28335 作为控制芯片,采用三菱公司生产的智能功率模块 (PM) PM50RLB120 作为开关器件,进行降压验证实验。令中间直流电压为 450 V,直流电容为 1 000 μF,进线电

感为 2 mH,设计容量为 10 kvar。实验平台中电源部分采用三相可编程交流电源,电源相电压为 90 V/50 Hz,负载采用两组三相整流桥,一组的直流侧接电炉(阻值不变),阻值为 10 Ω,另一组直流侧接可编程负载电阻(阻值可变)阻值 0 ~ 100 Ω 可调。

3.1 三相对称负载实验

本研究将两组负载都接入实验平台,其中可调负载设置为 12 Ω,此时三相负载对称,观察 APF 投入运行前后,系统电流的变化如图 7 所示。由图 7 可以看出,在 APF 投入运行后,电流波形有了较明显的改善,经 FFT 分析得到,A 相电流的总谐波畸变率由原来的 19.4% 变为 6.3%,各单次谐波含量均小于 5%。

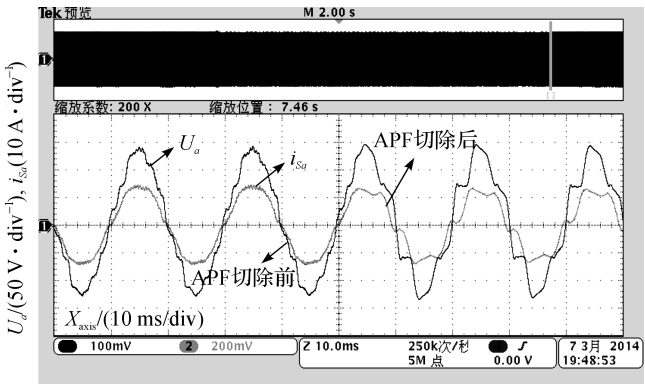


图7 负载对称情况下 A 相电流电压波形

3.2 三相负载突变实验

两组负载都接入实验平台,可变负载功率开始先设置为 25 Ω,APF 投入运行稳定后,调到 12.5 Ω,观察负载变化前后 APF 的滤波效果,负载突变情况下 A 相电流电压波形如图 8 所示。从图 8 中可以看出,加载之后,A 相电流幅值比之前要高,但是波形仍然是正弦化的,电流波形经 FFT 分析,发现其总谐波畸变率在 APF 投入前是 25.3%,APF 投入后,未加重负载时是 6.2%,加重负载后是 6.3%,且各单次谐波含量均低于 5%。

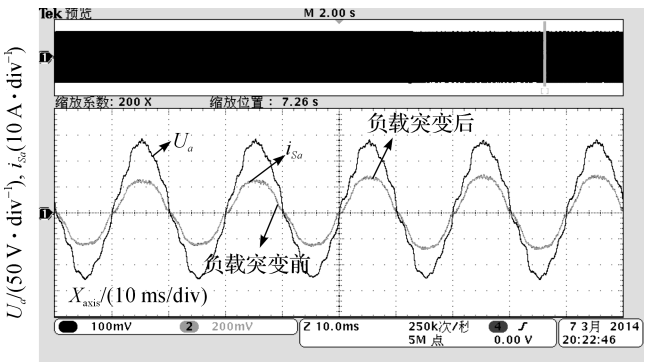


图8 负载突变情况下 A 相电流电压波形

3.3 三相负载不平衡实验

本研究将一组不变负载(电炉)接入实验平台,同时将一个单相不可控整流桥接入 A、B 两相之间,单相整流桥的直流侧接可编程电阻,设置其功率为 2 kW,这样,三相负载将不再是平衡负载。观察 APF 投入前、后,电源电流波形的变化如图 9 所示。从图 9 中可以看出,APF 投入运行之后,A、B 两相的电流波形有明显的改善,对 A 相电流进行 FFT 分析,发现其电流的谐波总畸变率由原来的 10.3% 降为 5.8%,而各单次谐波的含量均低于 5%。

由以上实验数据可知,该 APF 样机无论是在负载对称、负载突变还是负载不对称情况下,都能有较好的工作特性,滤波效果较理想。

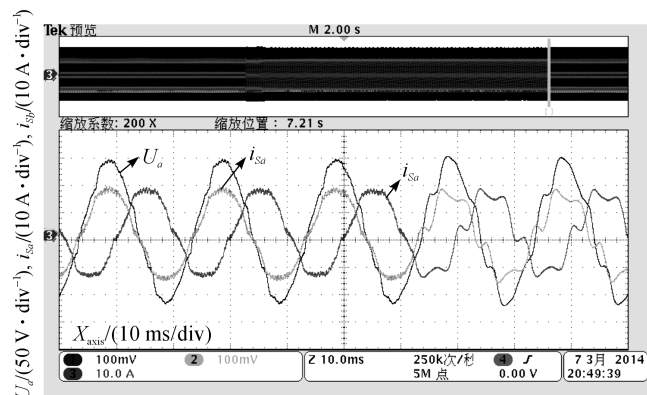


图 9 负载不平衡情况下 A、B 相电流波形

4 结束语

本研究在分析了锁相环对 APF 性能有重要影响的前提下,仿真比较了有源滤波器的两种软件锁相环性能差异,选择了性能更优异的 DDSRF-SPLL 作为本研究中 APF 的锁相环,并且仿真了采用该锁相环的 APF 在不同负载情况下的滤波表现,最后通过样机实验加以验证。

本研究中的 APF 样机虽能实现基本功能,但滤波特性还有改善的空间,总谐波畸变率(THD)相对还是

较高,要将 THD 控制在 5% 以内,还需在补偿电流输出端加输出滤波器以及将现有控制算法进行改进,才能达到令人满意的其滤波效果,这将是后续工作的重点。

参考文献(References):

- [1] 乔治. 电力系统谐波—基本原理、分析方法和滤波器设计[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [2] 吴竟昌. 供电系统谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 许遐. 公用电网谐波的评估和调控[M]. 北京:中国电力出版社,2008.
- [4] 谭亲跃. 大容量脉冲功率系统对电能质量的影响研究[D]. 武汉:华中科技大学电气与电子工程学院,2011.
- [5] 金恒立,刘志刚,张刚,等. 并联型有源滤波器主电路关键参数设计[J]. 电工技术学报,2011,26(12):106-122.
- [6] 陈仲. 并联有源滤波器实用关键技术的研究[D]. 杭州:浙江大学电气工程学院,2005.
- [7] 郑谓. 适于舰船谐波抑制与无功补偿的有源滤波器研制[D]. 杭州:浙江工业大学信息工程学院,2014.
- [8] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,2005.
- [9] 姜齐荣,赵东元,陈建业. 有源滤波器结构原理控制[M]. 北京:科学出版社,2005.
- [10] AKAGI H, KANAZAWA Y, NABAE A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuit[J]. IEEE&JIEE proceeding IPEC,1983,32(6):1375-1386.
- [11] 张兴,张崇巍. PWM 整流器及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2012.
- [12] RODRIGUZE P, BERGAS J. Decoupled double synchronous reference frame PLL for power converters control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2007,22(2):584-592.
- [13] 吴静,赵伟. 适用于非同步采样的相位差准确测量方法[J]. 电网技术,2006,30(7):73-76.

[编辑:李辉]

本文引用格式:

姚成泽,张有兵,谢路耀,等. 基于双同步坐标系的解耦锁相环在并联型 APF 中的应用[J]. 机电工程,2015,32(5):712-716.

YAO Cheng-ze, ZHANG You-bing, XIE Lu-yao, et al. Application of decoupled double synchronous reference frame PLL on shunt active power filter[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015,32(5):712-716.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>