

带耦合变压器的直流侧有源电力滤波器的仿真研究

侯世英, 曾建兴, 房勇, 张诣, 张闯

(输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆市 沙坪坝区 400044)

Simulation Study on DC Side Series Active Power Filter Based on Coupling Transformer

HOU Shiying, ZENG Jianxing, FANG Yong, ZHANG Yi, ZHANG Chuang

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology
(Chongqing University), Shapingba District, Chongqing 400044, China)

ABSTRACT: A new DC side series active power filter (APF) is proposed, in which the APF is connected to main circuit via a coupling transformer, which acts as transformer and reactor. Comparing with the APFs without transformer, the proposed APF can flexibly vary the output voltage in a wide range, thus the capacity of switching component can be fully utilized and the insulation isolation between the APF and main circuit is implemented to prevent the interferences from power system directly come into the APF. Besides, the number of active switch is reduced by half than that in traditional AC side APFs, thus the circuit structure is simplified and the cost is decreased. Results from theoretical analysis and simulation show that the proposed topological structure is correct.

KEY WORDS: active power filter; DC side; transformer; series type; harmonics

摘要: 提出了一种基于耦合变压器的直流侧串联型有源电力滤波器(active power filter, APF)。该 APF 通过一个耦合变压器与主电路相连。与不带变压器的直流侧串联型 APF 相比, 它可以灵活地、大范围地改变 APF 的输出电压, 从而充分利用开关器件的容量, 并且能够实现 APF 与主电路的绝缘隔离, 防止电力系统的各种干扰直接进入 APF 中; 与传统的交流侧串联型有源电力滤波器相比, 有源开关的数量减少了一半, 简化了电路结构, 降低了成本。理论分析及仿真结果验证了所提拓扑结构的正确性及优越性。

关键词: 有源电力滤波器; 直流侧; 变压器; 串联型; 谐波

0 引言

电力电子装置在电力系统中的广泛使用, 给电网注入了大量的谐波电流, 造成了严重的谐波污染。有源电力滤波器(active power filter, APF)作为一种有效的谐波抑制装置已经成为广大学者研究的热点^[1-6]。目前, APF 的研究主要集中在并联型

APF, 但是并联型 APF 对电压型谐波源的负载来说(如电容滤波的整流器)并不是一种理想的补偿装置, 这类负载更适合用串联型 APF 来补偿^[7-13]。

文献[14]提出一种直流侧并联型 APF, 专门用于整流负荷的谐波治理, 将有源开关数量减少了一半, 改善了补偿效果; 文献[15-16]提出并研究了一种单相直流侧串联型有源电力滤波器, 该单相直流侧串联型有源电力滤波器串联在单相整流桥的直流侧, 主电路只有 2 个开关管, 结构简单, 控制方便; 文献[17]对文献[15]提出的结构进行了改进, 提出了一种单相输出可调压的新型直流侧串联型有源电力滤波器, 实现了输出电压的可调, 简化了相应控制, 减小了储能电容容量。本文提出一种基于耦合变压器的直流侧串联型有源电力滤波器, 在直流侧通过一个耦合变压器使 APF 与主电路相连。

1 电路拓扑及工作原理

1.1 电路拓扑

基于耦合变压器的直流侧串联型有源电力滤波器主电路拓扑如图 1 所示。图中: S_1 、 S_2 为有源开关; D_1 、 D_2 为二极管; C_1 为储能电容; C_0 为滤波电容; L 为平波电感; T 为变压器, 其变比为 $n_1:n_2$ 。耦合变压器的使用需要注意以下几点:

1) 当电流很大时耦合变压器可能工作在直流

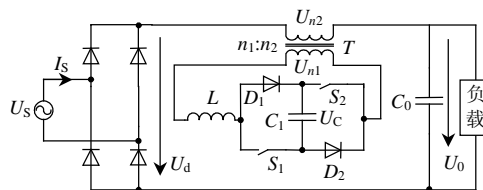


图 1 基于变压器的直流侧串联型 APF 主电路
Fig. 1 Main circuit of DC side series APF based on transformer

偏磁状态, 容易使变压器的铁心饱和, 使系统不能正常工作。

2) 耦合变压器的励磁电流相对一般变压器比较大, 其铁心需带有气隙。

3) 耦合变压器必须要有较宽工作频带。由于谐波的频率范围较宽, 如从次谐波到 50 次谐波, 即频率从几 Hz 到 2500Hz, 所以要求耦合变压器的通频带从几 Hz 到 2500Hz。

4) 耦合变压器对漏抗有较高的要求。对于串联变压器要求基波的漏抗很小, 才能保证串联变压器负荷侧的短路容量不会显著变小。

5) 有源电力滤波器的耦合变压器通常采用单相变压器或三相五铁心结构, 防止变压器三相磁路互相影响, 一般铁心材料选用薄硅钢片或非晶合金磁性材料。

针对以上几点, 应在保证耦合变压器的铁心不饱和及电抗值适中的情况下, 尽量减小气隙尺寸以提高耦合变压器传输效率。

1.2 工作原理

在电路中, 有源开关 S_1 为低频开关, 主要用于调整 APF 的能量流向; S_2 为高频开关, 通过控制有源开关 S_2 的通断, 可以使 APF 成为一个完全可控的电压源, 使其产生一个与负载谐波源大小相等相位相反的电压。设一个高频开关周期对应的时间为 T_S , 其导通占空比 d 。为了分析方便, 做如下简化处理: 假定高频开关 S_2 开关频率远高于电源工频和非线性负载电流的频率, 在理想情况下, 电源电压 U_S 为正弦波; APF 的储能电容 C_1 很大, 使 U_C 在稳态时近似为恒值; 变压器 T 为理想变压器。

下面分 2 个区间 I、II 对电路进行分析。区间 I, 当整流桥直流侧电压大于输出电压时, 即 $U_d > U_0$ 时, 低频开关 S_1 关断, 电源向负载供电, 同时向储能电容 C_0 充电, APF 储存能量, 其等效电路如图 2 所示。

每个高频开关周期 T_S 内, 在 $0 < t < dT_S$ 期间, 高频开关 S_2 导通, 二极管 D_2 关断, 等效电路如图 3 所示。

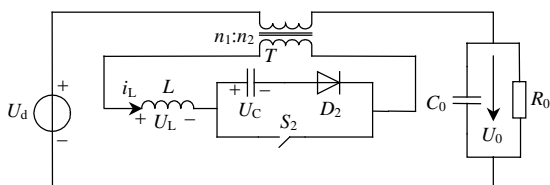


图 2 区间 I 时的等效电路
Fig. 2 The equivalent circuit in interval I

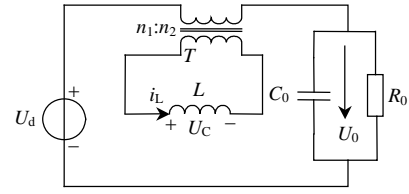


图 3 区间 I, $0 < t < dT_S$ 的等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit while $0 < t < dT_S$ in interval I
设变压器的一次侧与 APF 连接, 一次侧与二次侧的电压分别为 U_{n1} 、 U_{n2} 。又变压器的变比为 $n_1:n_2$, 那么有

$$U_{n1}n_2 = U_{n2}n_1 \quad (1)$$

$$U_L = U_{n1} = \frac{n_1}{n_2}U_{n2} \quad (2)$$

设 I_0 为某一时刻的电感电流初始值, 电感电流为

$$i_L = \frac{U_L}{L}t + I_0 = \frac{U_{n1}}{L}t + I_0 \quad (3)$$

在 $dT_S < t < T_S$ 期间, 高频开关 S_2 关断, 二极管 D_2 续流导通, 等效电路如图 4 所示。此时电感电压为

$$U_L = U_{n1} - U_C = \frac{n_1}{n_2}U_{n2} - U_C \quad (4)$$

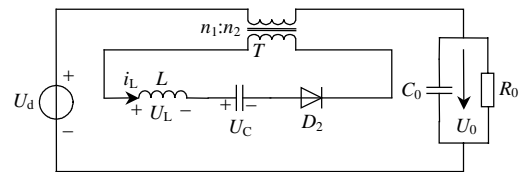


图 4 区间 I, $dT_S < t < T_S$ 的等效电路

Fig. 4 The equivalent circuit while $dT_S < t < T_S$ in interval I
稳态时, 电感电流在一个高频开关周期 T_S 内不突变, 电感上的电压满足伏秒平衡, 即有

$$dT_S \frac{n_1}{n_2}U_{n2} + (1-d)T_S \left(\frac{n_1}{n_2}U_{n2} - U_C \right) = 0 \quad (5)$$

整理得

$$U_{n2} = \frac{n_2}{n_1}(1-d)U_C \quad (6)$$

区间 II, 当整流桥直流侧电压小于输出电压时, 即 $U_d < U_0$ 时, 低频开关 S_1 导通, APF 释放能量, 其等效电路如图 5 所示。

在 $0 < t < dT_S$ 期间, 高频开关 S_2 导通, 等效电路如图 6 所示, 电感电压为

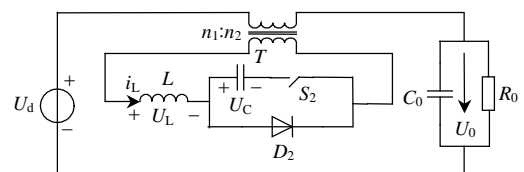


图 5 区间 II 的等效电路
Fig. 5 The equivalent circuit in interval II

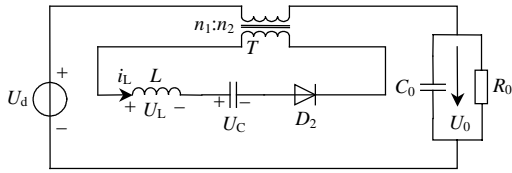


图6 区间 II, $0 < t < dT_s$ 的等效电路

Fig. 6 The equivalent circuit while $0 < t < dT_s$ in interval II

$$U_L = U_{n1} + U_C = \frac{n_1}{n_2} U_{n2} + U_C \quad (7)$$

在 $dT_s < t < T_s$ 期间, 高频开关 S_2 关断, 等效电路如图7所示, 电感电压为

$$U_L = \frac{n_1}{n_2} U_{n2} \quad (8)$$

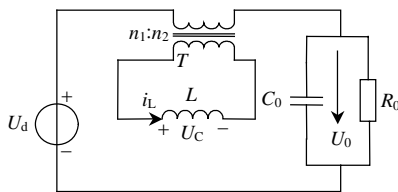


图7 区间 II, $dT_s < t < T_s$ 的等效电路

Fig. 7 The equivalent circuit while $dT_s < t < T_s$ in interval II

稳态时, 电感电流在一个高频开关周期 T_s 内不突变, 电感上的电压满足伏秒平衡, 即有

$$dT_s \left(\frac{n_1}{n_2} U_{n2} + U_C \right) + (1-d)T_s \frac{n_1}{n_2} U_{n2} = 0 \quad (9)$$

整理得

$$U_{n2} = -\frac{n_2}{n_1} dU_C \quad (10)$$

式(6)及式(10)说明 U_{n2} 在一个开关周期内可正可负, 即可以通过控制开关的通断来控制直流侧串联型 APF, 使其产生补偿电压, 能够实时跟踪非线性负载的谐波和无功的变化。

2 控制策略

假设直流侧 APF 正常工作时, 完全补偿了系统谐波和无功部分, 则电源电流应该与电源电压同频、同相, 即从整流桥往输出端看, 整流桥、有源电力滤波器与谐波源负载可以被认为是一个等效的纯电阻 R_e 。此时图1的等效电路如图8所示。由图8可得

$$U_s = I_s R_e \quad (11)$$

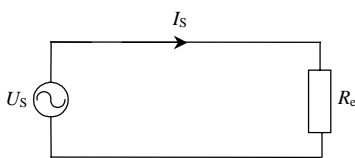


图8 补偿后的等效电路

Fig. 8 The equivalent circuit after compensation

式(11)为 APF 的控制目标式, 可以通过控制 APF 2 个开关 S_1 、 S_2 来实现, 其中 S_1 为低频开关, 由前面的分析可知, 当 $U_d > U_0$ 时 S_1 断开; 当 $U_d < U_0$ 时 S_1 开通。 S_1 的控制逻辑如图9所示。

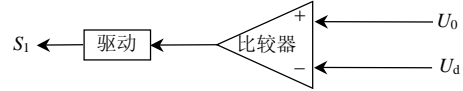


图9 S_1 控制逻辑框图

Fig. 9 Diagram of control logic for S_1

S_2 为高频开关, 采用典型的双环控制, 外环为电压环, 可以控制直流侧 APF 的电容电压 U_C , 内环为电流环, 可以迫使输入电流强迫跟踪电源电压, 实现式(11)。图10为 S_2 的控制框图。

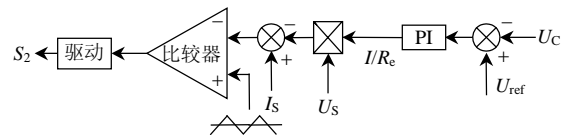


图10 S_2 控制逻辑框图

Fig. 10 Diagram of control logic for S_2

由图10可知, 控制 S_2 要采集的量有: APF 直流侧电容电压 U_C 、电源电压 U_s 、电源电流 I_s 。参考电压 U_{ref} 为一给定的常数, 它与 U_C 比较之后通过调节 PI 参数可以获得 $1/R_e$ 。

根据以上的分析可知较大的直流电流流过变压器会对变压器造成直流磁化现象, 甚至会带来一定的谐波, 对电网带来不利的影响。但是由于上述的控制思想是把整流桥、直流侧 APF、变压器及负载等效为一个阻性负载, 这样在控制 APF 补偿电压时实质上已经考虑了变压器产生的磁化带来的谐波, 因此就解决了直流磁化对滤波器性能的影响。

3 仿真研究

采用 PSIM 仿真软件, 按图1搭建主电路, 按图9及图10设计控制电路, 进行仿真。仿真参数设置如下: 电源电压有效值为 220V; 频率为 50Hz; 滤波电感 L 为 1mH; 滤波电容 C_0 为 2500 μ F; 储能电容 C_1 为 2000 μ F; 负载 R_0 为 20 Ω ; 变压器变比 $n_1:n_2$ 为 1:2。

图11为电源电压波形、APF 补偿前后的电源电流波形。图12为补偿前后电源电流频谱图。加入 APF 前, 电源电流带有大量谐波, 其功率因数为 0.63, 总的谐波畸变率为 145.5%; 补偿后, 电源电流谐波得到有效抑制, 其功率因素为 0.98, 总的谐波畸变率为 2.2%。可见, APF 很好地改善了功率因素, 抑制了谐波, 达到了补偿目的。

图13(a)为负载在 0.15s 从 20 Ω 突变到 10 Ω 时

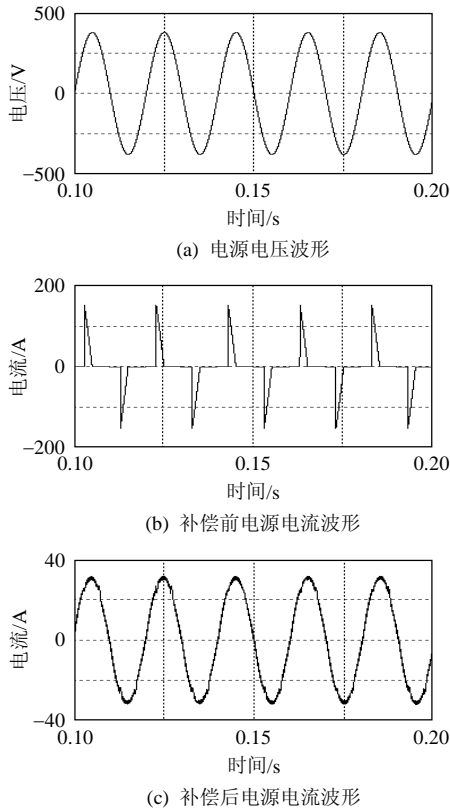


图 11 仿真结果

Fig. 11 Simulation results

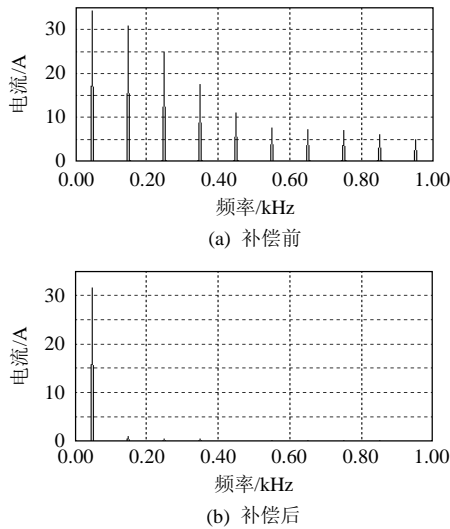


图 12 电源电流频谱

Fig. 12 The frequency spectrums of source current

的电源电流波形,图 13(b)为负载从 20Ω 突变到 40Ω 时的电流波形。由图 13 可见,当负载发生突变后,系统在 1 个周期内很快就能进入新的稳态,无论是在重载还是轻载情况下,APF 都能快速、有效地补偿系统谐波和无功。

4 结论

本文提出的直流侧 APF 能够灵活地、大范围地改变 APF 的输出电压和电流,减小储能电容的电

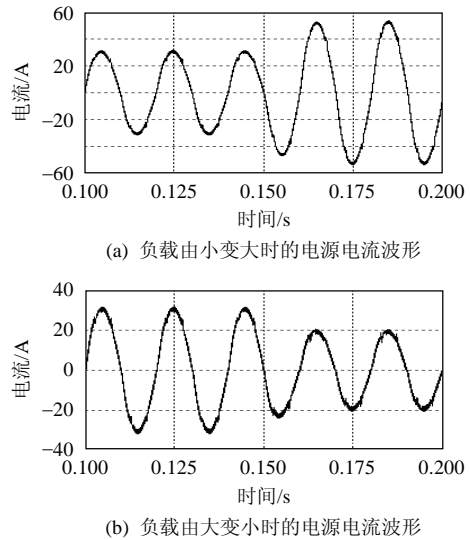


图 13 负载突变时的暂态响应

Fig. 13 Transient responses when the load change abruptly

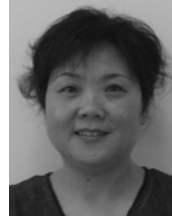
压,从而充分利用开关器件的电压电流容量。此外,该 APF 能实现与主电路的绝缘隔离,可以防止电力系统的各种干扰直接进入到有源电力滤波器中,提高了可靠性。

引入耦合变压器也会带来一些负面影响,要考虑变压器直流偏磁、气隙、工作频带、漏抗等因素。此外,变压器也会带来一定的损耗,使装置的整体效率下降,引入变压器后 APF 的效率约下降 4%~8%,特别是气隙尺寸较大时,损耗较大,总体装置的能量利用率约为 80%左右。

参考文献

- [1] 万蕴杰,周林,张海,等. 基于数字信号处理器的有源电力滤波器控制方案综述[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 51-55.
Wan Yunjie, Zhou lin, Zhang Hai, et al. Control schemes of active power filter using digital signal processor[J]. Power System Technology, 2005, 29(15): 51-55(in Chinese).
- [2] 曾江,刘艳,叶小军,等. 有源滤波器的低损耗滞环电流控制方法[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 73-78.
Zeng Jiang, Liu Yan, Ye Xiaojun, et al. A novel hysteresis current control method for active power filter with low switching loss[J]. Power System Technology, 2010, 34(1): 73-78(in Chinese).
- [3] Pan Z G, Peng F Z, Wang S L. Power factor correction using a series active filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2005, 20(1): 148-153.
- [4] Quesada I, Lazaro A, Barrado A. Extension of the harmonic elimination technique in the presence of non linear loads[C]//Power Electronics Specialists Conference. Orlando, USA: IEEE, 2007: 43-46.
- [5] 张大禹,谭光慧,纪延超. 级联型有源电力滤波器的新型控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(3): 70-74.
Zhang Dayu, Tan Guanghui, Ji Yanchao. A novel control strategy for cascaded active power filters[J]. Power System Technology, 2008, 32(3): 70-74(in Chinese).
- [6] 周维维,张东,杜雄,等. 一种新型的串联型有源电力滤波器[J].

- 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 41-45.
- Zhou Louwei, Zhang Dong, Du Xiong, et al. A novel series active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 41-45(in Chinese).
- [7] 王广柱. 有源电力滤波器两种补偿目标的分析和比较[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 115-120.
- Wang Guangzhu. Comparison between two types of compensation objectives in active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 115-120(in Chinese).
- [8] Da Yili, Jun Tian. A novel active power filter for the voltage-source type harmonic source[C]//International Conference on Electrical Machines and Systems. Wuhan, China: IEEE, 2008: 2077-2080.
- [9] 李圣清, 刘苗生, 罗飞. 有源电力滤波器对变流器谐波源补偿特性的研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2002, 29(3): 75-80.
- Li Shengqing, Liu Miaosheng, Luo Fei. Study on compensation characteristics of active power filter to converter of harmonic sources[J]. Journal of Hunan University: Natural Science, 2002, 29(3): 75-80(in Chinese).
- [10] 杜雄. 电力谐波有源补偿新方法的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2005.
- [11] 姚为正, 王群, 王兆安, 等. 有源电力滤波器对不同类型谐波源的补偿特性[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 40-44.
- Yao Weizheng, Wang Qun, Liu Jinjun, et al. Compensation characteristics of active power filter to different types of harmonic sources[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 40-44(in Chinese).
- [12] 侯世英, 郑含博, 周维维, 等. 新型直流侧串联型有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2008, 32(15): 36-40.
- Hou Shiyong, Zheng Hanbo, Zhou Luowei, et al. A novel DC side series active power filter[J]. Power System Technology, 2008, 32(15): 36-40(in Chinese).
- [13] 侯世英, 郑含博, 周维维, 等. 基于单周控制的三相直流侧串联型有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2008, 32(18): 52-56.
- Hou Shiyong, Zheng Hanbo, Zhou Luowei, et al. A novel three-phase DC side series active power filter with one cycle control[J]. Power System Technology, 2008, 32(18): 52-56(in Chinese).
- [14] 谢品芳, 杜雄, 周维维. 单周控制直流侧单相有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2003, 18(4): 51-55.
- Xie Pinfang, Du Xiong, Zhou Luowei. One cycle controlled DC side single phase active power filter[J]. Transactions of China Electro-technical Society, 2003, 18(4): 51-55(in Chinese).
- [15] 侯世英, 郑含博, 刘庚, 等. 单相串联型直流侧有源电力滤波器[J]. 重庆大学学报: 自然科学版, 2008, 31(4): 408-412.
- Hou Shiyong, Zheng Hanbo, Liu Geng, et al. A series type direct current side active power filter on single phase[J]. Journal of Chongqing University: Natural Science, 2008, 31(4): 408-412(in Chinese).
- [16] 侯世英, 郑含博, 周维维, 等. 双环控制整流桥直流侧串联型有源电力滤波器及实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(4): 78-83.
- Hou Shiyong, Zheng Hanbo, Zhou Luowei, et al. DC side series active power filter and experimental study with dual control[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(4): 78-83 (in Chinese).
- [17] 侯世英, 嵇丽明, 索丽娟, 等. 改进的直流侧有源电力滤波器[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 63-67.
- Hou Shiyong, Ji Liming, Suo Lijian, et al. An improved DC side series active power filter[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 63-67(in Chinese).



侯世英

收稿日期: 2010-12-08。

作者简介:

侯世英(1962), 女, 博士, 教授, 研究方向为控制理论、电力电子技术在电力系统中的应用, E-mail: houshiying@163.com;

曾建兴(1982), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用, E-mail: zjxyzln@163.com;

房勇(1983), 男, 硕士研究生, 研究方向为可再生能源发电技术;
张诣(1986), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;

张闯(1985), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。

(责任编辑 褚晓杰)