

并联混合型有源电力滤波器滤波特性分析

孙浩, 周维维

(重庆大学电气工程学院高电压与电工新技术教育部重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 为了比较不同并联混合型有源电力滤波器的滤波特性及电源阻抗对其滤波特性的影响, 选用了四种典型的并联混合型有源电力滤波器拓扑结构, 分析了它们的工作原理。首先在固定电源阻抗时, 画出了在同样的电路参数和控制方式下, 不同的并联混合型有源电力滤波器拓扑结构中, 流入电源的谐波电流与负载谐波电流比值的波特图, 然后在电源阻抗发生变化的情况下, 画出了流入电源的谐波电流与负载谐波电流比值的波特图, 通过对这些波特图的分析, 比较了不同并联混合型有源电力滤波器的滤波特性以及电源阻抗对其滤波特性的影响, 从而找到了滤波效果较好的并联混合型有源电力滤波器的拓扑结构。

关键词: 并联混合型有源电力滤波器; 电源阻抗; 滤波特性; 波特图

Filter performance analysis of hybrid shunt active power filter

SUN Hao, ZHOU Luo-wei

(The Key Laboratory of High Voltage Engineering & Electrical New Technology, Ministry of Education,
Electrical Engineering College of Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: In order to compare the filter characteristics of different hybrid shunt active power filter (HSAPF) and the influence of the source impedance to filter performance, four typical topology of the hybrid shunt active power filter (HSAPF) are selected in this paper, of which the operating principles are analyzed. First of all, when source impedance is invariable, the bode diagrams of the ratio of the harmonic currents flowing into the power supply to the load is drawn under the same parameters and control conditions, and then, the bode diagrams of the ratio of the harmonic currents flowing into the power supply to the load is drawn while the source is different. The filter characteristics and the influence of the source impedance to filter performance are compared according to the analysis of the bode diagrams. Consequently, the topology of HSAPF which has preferable filter characteristics is found.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Chongqing(No.CSTC2006BB6210).

Key words: hybrid shunt active power filter; source impedance; filter performance; bode diagram

中图分类号: TM711

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)08-0061-05

0 引言

为了治理谐波, 文献[1~3]提出了使用有源滤波器, 有源滤波器虽然具有补偿效果好的特点, 但是其处理功率大, 成本高, 而且受到电力电子器件容量的限制, 其容量难以满足大容量的要求。为了减小有源滤波器的容量, 将有源滤波器和无源滤波器相结合, 文献[4~13]提出并联型混合滤波器结构。文献[14]对不同 HAPF 有源部分容量进行了研究, 为实际应用中从有源部分容量大小的角度选择 HAPF 提供的依据, 但目前所见到的对 HAPF 滤波性能研究的文章一般都是针对一种 HAPF 进行研究, 如文献[5, 15]等, 这种研究只能说明该 HAPF 能够实现谐波补偿, 却不能说明与其它的 HAPF 相

比, 该 HAPF 在滤波特性上是否具有优势, 由于实际应用中, 并联型 HAPF 的应用比串联型 HAPF 的应用多得多, 所以本文对目前已有的几种典型的并联混合型有源电力滤波器的拓扑结构进行了分析, 在同样的硬件参数和同样的控制下, 从滤波特性的角度出发, 比较了不同电路中电源电流谐波的衰减情况, 对实际应用中选择拓扑结构具有一定的参考价值。

1 几种典型的并联混合型有源电力滤波器的结构及工作原理

目前已有的并联混合型有源电力滤波器的主电路拓扑结构有很多种, 除了文献[9]、[10]、[12]、[13]、[16]所采用的四种拓扑结构外, 还有文献[6~8]所采用的拓扑结构, 但文献[6]所采用的结构中, 有源部分与无源部分是相互独立的, 其有源部

基金项目: 重庆市自然科学基金 (CSTC2006BB6210)

分承受的容量过大,实用性较差,故对其滤波特性,本文不做分析;文献[7]所采用的结构与本文第二种结构相比,在有源部分正常工作时,滤波特性是一样的,所以本文也不单独分析;文献[8]所采用的结构,则是本文第二种结构在无高次谐波滤波器时的特例所以本文也不做分析,以文献[9]、[10]、[12]、[13]、[16]所采用的四种拓扑为例,分析他们的电路结构和工作原理如下。

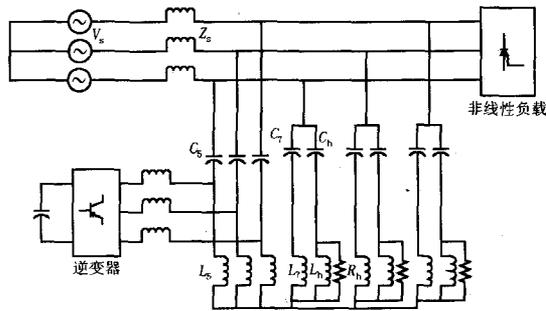


图1 第一种并联混合型有源电力滤波器
Fig.1 The first HSAFP

文献[9,10]中的并联混合有源电力滤波器如图1所示,电容 C_5 、 C_7 、 C_n 和电感 L_5 、 L_7 、 L_n 及电阻 R_n 一起组成滤除5次、7次以及高次谐波的无源滤波器。有源滤波器接在 C_5 、 L_5 之间,用来改善无源滤波器的滤波特性,并抑制5次谐波支路与电网阻抗间可能发生的谐振。其单相等效电路图如图2所示。假设有源电力滤波器是一个理想的受控电压源 V_1 ,谐波源被看作是一个电流源 I_L 。在以下的分析中,各参数中,下标 f 代表基波分量, h 代表谐波分量。由图2的等效电路图,只考虑谐波分量时,根据文献[11]可得:

$$I_{sh} = \frac{Z_{FC} I_{Lh} + k V_{Sh}}{Z_{FC} + Z_s + K} \quad (1)$$

(其中 K 为控制系数,即控制 $V_{1h} = K I_{Sh}$,可具体调整, $k = \frac{Z_{FC}}{Z_L} + 1$, $Z_s' = k Z_s$)

第一种结构:

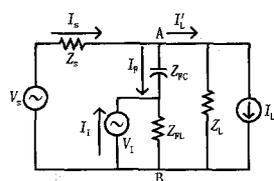


图2 图1的单相等效电路

Fig.2 Single-phase equivalent circuit of figure 1

从式(1)可以看出,当 I_{Lh} 、 V_{Sh} 为定值时,如果

K 增大, I_{Sh} 将减小。当 K 足够大时,大部分的谐波将流入混合滤波器中,达到了很好的滤波效果。而且当不考虑系统电压畸变引起的谐波电流时,即令 $V_{Sh} = 0$,从式(1)可以看出,对于 I_{Sh} 而言,这相当于在电网支路串联了一个谐波电阻 K ,因此,必然有更多的谐波电流流入滤波器中。如果 $K \gg |Z_{FC}|$,则由负载产生的谐波电流将几乎全流入滤波器中。如果 $K \gg |Z_s|$,则滤波特性由 K 决定。除此外, K 还起到阻尼 Z_s' 和 Z_F 谐振的作用。

第二种结构:

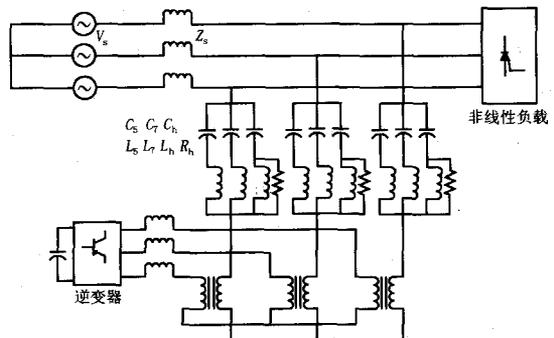


图3 第二种并联混合型有源电力滤波器
Fig.3 The second HSAFP

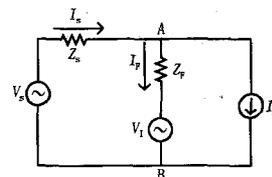


图4 图3的单相等效电路

Fig.4 Single-phase equivalent circuit of figure 3

文献[16]采用的并联混合型有源电力滤波器如图3所示,除5次、7次以及高次谐波的无源滤波器并联后与有源滤波器串联。有源部分主要用来改善滤波器的滤波特性。其单相等效电路图如图4所示。

由图4可知:
$$I_{sh} = \frac{V_{Sh} + Z_F I_{Lh}}{Z_s + Z_F + K} \quad (2)$$

第三种结构:

文献[12]采用的并联混合型有源电力滤波器如图5所示,实际上是图3电路的改进,是在滤波器的每相都串联一个基波谐振支路,目的是减小有源部分的容量,但同时,由于基波谐振的存在,使得基波时,逆变器的输出不能对电网电流产生影响,此时,滤波器只能补偿固定无功,不能像第二种那样,可以通过调节 β (其中 $V_{1f} = \beta V_{AB}$)来调节无功补偿的大小^[11]。图6是其单相等效电路图,由图6只考虑谐波分量可得:

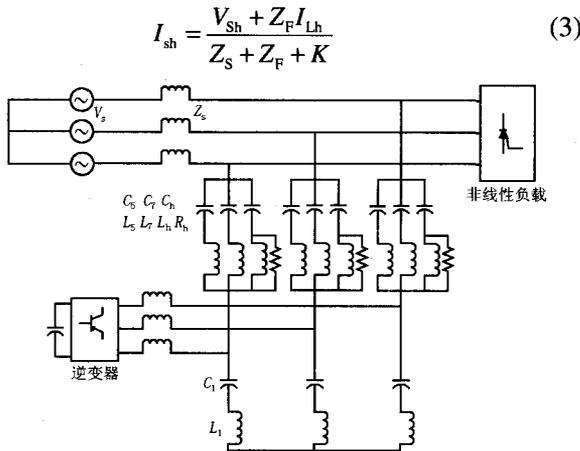


图5 第三种并联混合型有源电力滤波器

Fig.5 The third HSAFP

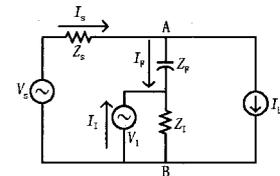


图6 图5的单相等效电路

Fig.6 Single-phase equivalent circuit of figure 5

第四种结构:

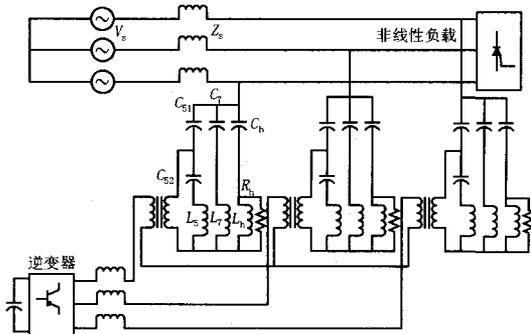


图7 第四种并联混合型有源电力滤波器

Fig.7 The fourth HSAFP

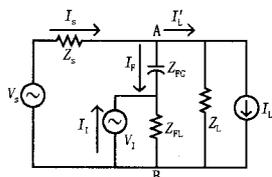


图8 图7的单相等效电路

Fig.8 Single-phase equivalent circuit of figure 7

文献[13]采用的并联混合型有源电力滤波器如图7所示,是在图1基础上的改进。它将五次单调谐振无源滤波器的电容分为两部分,一部分与谐振电抗器构成基波谐振回路,逆变器输出电压通过耦

合变压器连接到此基波谐振回路,图7中, \$C_{s1}\$、\$C_{s2}\$ 和 \$L_s\$ 组成的 LC 滤波支路调谐在 5 次谐波频率,而 \$L_s\$ 与 \$C_{s2}\$ 调谐在基波频率。这样,利用 \$L_s\$ 和 \$C_{s2}\$ 对基波谐振的特性,使有源电力滤波器既不承受基波电压也不承受基波电流,从而极大地减小了有源电力滤波器的容量,降低有源谐波补偿系统的投资,提高性能价格比,达到 APF 实用化及谐波抑制的目的。由其单相等效电路图 8 可得:

$$I_{sh} = \frac{Z_{FC} I_{Lh} + k V_{sh}}{Z_{FC} + Z'_s + K} \quad (4)$$

其中: $k = \frac{Z_{FC}}{Z_L} + 1$ $Z'_s = k Z_s$

2 不同并联混合型电力滤波器滤波特性的分析

为了比较上述几种电路滤波效果的好坏,可比较在同样的硬件参数和控制系数下,不同电路的谐波电流衰减的情况。显然,当不加上有源部分时,上面四种电路是同一电路(第三种电路同时去掉基波谐振支路)。由文献[17]可知电网谐波主要是 5 次和 7 次,参考文献[12]、根据文献[18]的方法给出无源滤波器的参数如下:

- $C_1 = 1260 \mu\text{F}, L_1 = 8.05 \text{ mH}, Q=10;$
- $C_5 = 126 \mu\text{F}, L_5 = 3.22 \text{ mH}, Q=10;$
- $C_7 = 72.5 \mu\text{F}, L_7 = 2.84 \text{ mH}, Q=10;$
- $C_h = 500 \mu\text{F}, L_h = 0.08 \text{ mH},$
- $R_h = 0.05 \Omega, Q=10;$

第四种电路中: $C_{s1} = 131.25 \mu\text{F}, C_{s2} = 3150 \mu\text{F}$
电源阻抗为: $L_s = 3 \text{ mH}, R_s = 0.1 \Omega$

由于实际系统中,电源电压的谐波含量非常小,近似为零,则由公式 1、2、3、4 利用软件 Matlab 可画出 $\alpha = I_{sh}/I_{Lh}$ 的波特图如图 9、图 10。

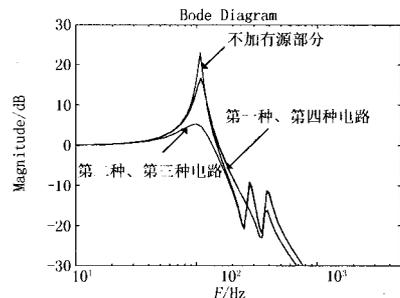


图9 K=1 时不同电路结构中 α 的波特图

Fig.9 Bode diagram of α in different circuit when K=1

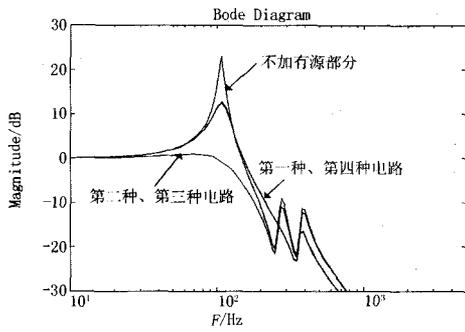


图 10 $K=2$ 时不同电路结构中 α 的波特图

Fig.10 Bode diagram of α in different circuit when $K=2$

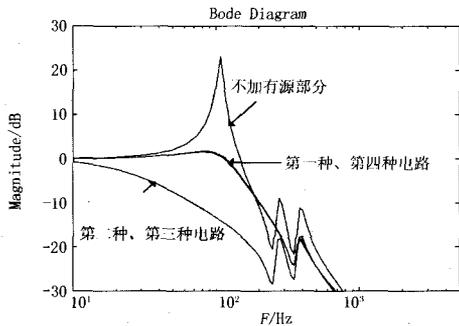


图 11 $K=10$ 时不同电路结构中 α 的波特图

Fig.11 Bode diagram of α in different circuit when $K=10$

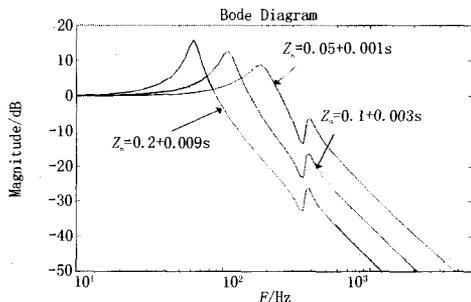


图 12 不同电源阻抗时, 第一、四种电路中 α 的波特图

Fig.12 Bode diagram of α in the first and the fourth circuit with different power impedance

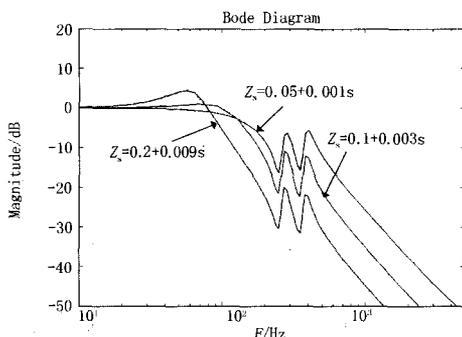


图 13 不同电源阻抗时, 第二、三种电路中 α 的波特图

Fig.13 Bode diagram of α in the second and the third circuit with different power impedance

由图 9、图 10、图 11 可以看出, 四种电路在不加有源部分时, 虽然在 5 次、7 次谐波处达到了设计的要求, 使 5 次、7 次谐波得到了很大的衰减, 但却引起了 2 次谐波的放大, 这将会影响滤波器的滤波特性, 同时, 这相当于给电网注入了新的谐波, 使电网电能质量下降。第一种、第四种电路要想很好地抑制这种谐波放大, K 值至少要大于 10 才行, 而第二种、第三种电路中, K 值只需大于 2, 就能很好地抑制这种谐波放大。而且, 第一种、第四种电路中, 由于有源部分的加入, 使 5 次谐振支路的电感失去了谐振的作用 (因为其两端相当于加了一个电压源), 所以其在 5 次谐波处, 没有得到有效的衰减, 使滤波器的滤波性能下降 (实际应用时, 对这种情况, 可再并联一条 2 次谐振支路, 并把有源部分加在 2 次谐振支路上, 可以达到很好的滤波效果, 但成本将会增加)。第二种、第三种电路加了有源部分后, 既保持了电路在 5 次、7 次谐波处良好的滤波效果, 又能消除因无源滤波器的加入而引起的 2 次谐波的放大 (只需 $K \geq 2$), 增加高次谐波的衰减, 从而很好地优化了纯无源滤波器的滤波效果。所以, 从滤波特性考虑, 在选择并联混合型有源电力滤波器时, 第二种、第三种电路是较好的选择。

由于实际应用中, 电源阻抗是变化的, 这将影响滤波器的滤波特性, 为研究电源阻抗变化对滤波器滤波特性的影响, 在 K 等于 2 的情况下, 画出了不同电源阻抗时 α 的波特图如图 12、13 所示。

由图 12、图 13 可以看出, 在同样的电路参数和控制方式下, 电源阻抗越大, 滤波器对高频谐波的滤波效果就越好, 但电源阻抗的增加又会引起低次谐波的放大。

3 结论

本文从目前已有的并联混合型有源电力滤波器拓扑结构中选出了四种典型结构, 分析了它们的工作原理, 画出了在同等条件下, 流入电源的谐波电流与负载谐波电流比值的波特图, 通过对波特图的分析, 得出如下结论:

1) 在同样的元器件参数和同样的控制方法下, 第二种、第三种电路的滤波特性优于第一种、第四种电路。

2) 在同样的电路参数和控制方式下, 电源阻抗越大, 滤波器对高频谐波的滤波效果就越好, 但电源阻抗的增加又会引起低次谐波的放大。

参考文献

[1] Habrouk M E, Darwish M K, Mehta P. Active Power

- Filters:A Review[J]. IEEE Proc Electr Power Appl,2000,147:403-413.
- [2] Akagi H. New Trends in Active Filter for Power Conditioning[J].IEEE Trans on Ind Appl,1996,32(6): 1312-1322.
- [3] Joos G, Moran L. Principles of Active Power Filters[A]. In:Tutorial Course Note of IEEE Indu Appl Society Annual Meeting[C]. 1998.
- [4] Peng F Z.Harmonic Sources and Filtering Approaches[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2001.
- [5] 翟茜,雷万钧,刘涛,等.分次补偿方式德并联型混合电力滤波器研究[J].电力系统自动化,2006,30(5). ZHAI Qian, LEI Wan-jun, LIU Tao,et al. Development of a Parallel Hybrid Power Filter With Respective Harmonic Compensation Method[J].Automation of Electric Power Systems,2006,30(5).
- [6] 颜晓庆,杨君,王兆安.并联混合型电力有源滤波器的研究[J].电力电子技术,1998. YAN Xiao-qing,YANG Jun,WANG Zhao-an.The Study on Hybrid Shunt Active Power Filter[J].Electric Power Electronics,1998.
- [7] 苻志平,王跃,杨君,等.新型单相混合有源电力滤波器的研究[J].电力电子技术,2003. FU Zhi-ping,WANG Yue,YANG Jun,et al.Study on Novel Single Phase Hybrid Active Power Filter[J]. Electric Power Electronics,2003.
- [8] 曾志东,杨君,王跃,等.一种新型三相混合电力滤波器的研究[J].电力电子技术,2003,37(3). ZENG Zhi-dong, YANG Jun, WANG Yue,et al.Analysis of a New Three Phase Hybrid Active Power Filter[J]. Electric Power Electronics, 2003,37(3).
- [9] 邹祖冰,蔡丽娟,贺佳兵.并联混合电力有源滤波器的非线性控制算法[J].电网技术,2004,28(20). ZOU Zu-bing, CAI Li-juan, HE Jia-bing.Nonlinear Control Algorithm of Active Power Filter for AC/DC Hybrid Power Grid[J].Power System Technology, 2004,28(20).
- [10] Park J H S, Nam K. New Hybrid Parallel Active Filter Configuration Minimising Active Filter Size[J]. IEE Proc Electr Power Appl, 2000,147(2).
- [11] Rivas D, Moran L,Dixon J W,et al.Improving Passive Filter Compensation Performance with Active Technique[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2003,50(1).
- [12] 邓占锋,朱东起,姜新建.降低有源部分容量的混合电力滤波器[J].清华大学学报(自然科学版),2003,43(3). DENG Zhan-feng, ZHU Dong-qi, JIANG Xin-jian. Reduced Rating of Active Filter in Hybrid Power Filter[J].Journal of Tsinghua University,2003,43(3).
- [13] 罗安,章兢,付青.新型注入式并联混合型有源电力滤波器[J].电工技术学报,2005. LUO An, ZHANG Jing.Development of High-Capacity Hybrid Active Power Filter[J].In:Proceedings of National Power Sources Techniques[C].2005.
- [14] 鞠建永,徐德鸿.混合型有源电力滤波器有源部分容量比较[A].全国电源技术年会论文集[C]. 2005. JU Jian-yong, XU De-hong.Analysis of Rating of Active Filter in Hybrid Power Filter[A].
- [15] 朱革兰,任震.高压直流输电系统混合直流滤波器性能研究[J].电力自动化设备,2001,21(8). ZHU Ge-lan, REN Zhen.A Study of Hybrid DC Filter for HVDC System[J].Electric Power Automatic Equipment, 2001,21(8).
- [16] Rivas D, Moran L, Dixon J,et al.A Simple Control Scheme for Hybrid Active Power Filter[J]. IEE Proc on Gener, Transm, and Distrib,2002,2002,149(4).
- [17] Hideaki Fujita, Takahiro Yamasaki, Hirofumi Akagi. A Hybrid Active Filter for Damping of Harmonic Resonance in Industrial Power Systems [J].IEEE Trans on Power Electronics, 2000, 15(2):209-216.
- [18] 涂春鸣,罗安,刘娟.无源滤波器的多目标优化设计[J].中国电机工程学报,2002,22(3):17-21. TU Chun-ming,LUO An,LIU Juan.Multi-objective Optimal Design of Passive Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE,2002, 22(3):17-21.

收稿日期:2006-11-04; 修回日期:2006-12-05

作者简介:

孙浩(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力电子技术
技术在电力系统中的应用,开关电源的软开关技术;
E-mail:s008hao@yahoo.com.cn

周维维(1954-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为
有源电力滤波器、功率因数校正技术、变换器控制理论、新
型高效电能变换拓扑结构等。

(上接第44页 continued from page 44)

- LEI Hang-zhou, HUANG Shu-wen,DONG Xiao-dong,et al.Research on the New Generation of WKH-891 Electrification Railway Feeder Line Protection[J]. Relay,2002, 30(6):47-49.
- [6] 安志琴.基于SCL建立IED配置文件的研究[D].北京:华北电力大学,2006. ANn Zhi-qin. The Research of Creating Configuration Files of IEDs in SCL[D]. Beijing:North China Electric Power University, 2006.

收稿日期:2006-10-23; 修回日期:2006-12-19

作者简介:

樊陈(1982-),男,硕士研究生,研究方向为微机保护及变电站综合自动化; E-mail:fc4503@163.com

陈小川(1967-),男,教授,研究方向为微机保护及变电站综合自动化;

马彦宇(1981-),男,硕士研究生,研究方向为微机保护及变电站综合自动化。