

一种单相并联混合型有源电力滤波器的研究

李海洋¹, 杨勇², 陈杰², 赵国生¹

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 提出一种新型单相并联混合型有源滤波器的拓扑结构, 分析了其基于磁通补偿和谐波分流技术的原理, 在无源部分只装设双调谐滤波器的情况下, 与传统并联混合型滤波器相比较, 有源滤波器 (APF) 所需容量大大减小; 采用检测相地间谐波电压的控制方式, 并进行相应的仿真研究。结果表明, 新型单相并联混合型有源滤波器滤波效果好, 控制方式可行, 有源滤波器所需容量很小。

关键词: 并联混合型有源滤波器; 双调谐滤波器; 谐波电压检测; APF

Research on single-phase parallel hybrid active power filter

LI Hai-yang¹, YANG Yong², CHEN Jie², ZHAO Guo-sheng¹

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;
2. XJ Electric Co., Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper presents a novel topology of single phase hybrid parallel active filter and analyzes its principle based on the magnetic flux compensation and the harmonic divergence technology. Compared with that the traditional hybrid parallel active filters are conducted in the circumstances of installing the double-tuned filter only, the result indicates the capacity of APF is greatly reduced. The corresponding simulation researches are conducted by use of the control mode of measuring the harmonic voltage between phase to ground. The result indicates the filter effect of the new single-phase parallel hybrid active filter is good, the control mode is feasible, and the active filter capacity required is very small.

Key words: parallel hybrid active power filter; double-tuned filter; harmonic voltage examination; APF

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)03-0053-05

0 引言

目前, 消除电网谐波的方法主要有无源滤波器、有源滤波器 (APF) 和混合型有源滤波器。在滤波效果和容量方面, 混合型有源滤波器一方面能较好地改善无源滤波器的滤波效果; 另一方面, 相对于单独使用的有源滤波器而言, 其装置容量大大降低^[1]。当前使用较为广泛的并联型混合有源滤波器为 APF 经变压器后再与无源滤波器串联接入电网, 其中无源滤波器承担大部分谐波和无功补偿任务, APF 起到补偿高次谐波和改善系统性能的作用, 此时 APF 需要提供的补偿电流较小, 从而使 APF 所需容量大大减小, 但在串联支路流过的基波电流较大时变压器一般需采用有气隙的变压器, 从而造成漏磁增加, 该漏磁通相当于在变压器的原边串联了一个空心电抗, 该电抗会影响无源滤波器的调谐效果并使有源滤波器所需容量增大。西安交通大学王兆安教授领导的研究小组, 提出将有源滤波器与一

个很小的附加电感通过耦合变压器并联后串入无源滤波器中的方法^[2], 此时由于附加电感与无源滤波器相比基波阻抗很小, 附加电感两端所占基波电压很小, APF 承受的电压很低。但该方案 APF 所需容量仍然大于 $\sum X_h \cdot I_h^2$ (I_h 为电网某次谐波电流值, X_h 为无源滤波器的某次谐波感抗)。

本文将采用一种新的并联混合型电力滤波方案, 该新型滤波器基于磁通补偿原理和谐波分流技术, 通过电路拓扑结构的改变, 使电网中的谐波电流流入三绕组变压器的两个线圈, 在变压器铁芯中产生的谐波磁通部分补偿, 未完全补偿的部分由 APF 产生的谐波电流的磁通进行补偿, 最终达到减小 APF 容量的目的。

1 系统构成及工作原理

所提单相并联混合型有源电力滤波器的拓扑结构如图 1 示, 该并联混合型滤波器由一组双调谐滤

波器、有源电力滤波器、三绕组变压器、空心电抗器 L、电容器 C 和投切断路器 DL 组成。

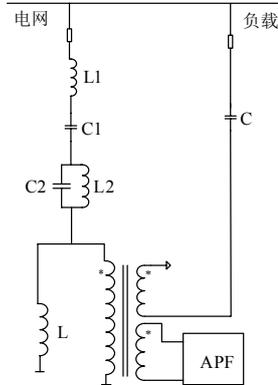


图 1 系统的单相拓扑结构
Fig.1 System's single-phase topology

采用双调谐滤波器与采用两个单调谐滤波器相比，其基波损耗较小，且只有一个电感 L1 承受全部冲击电压，同时可以避免使用高通滤波器时产生的较大发热损耗。双调谐滤波器设计成频率为 250 Hz 和 350 Hz 的 5 次、7 次纯调谐无源滤波器。空心电抗器 L 与三绕组变压器原边并联，三绕组变压器一副边绕组与电容器 C 串联后接入电网，另一副边绕组与 APF 相连。该方式中，谐波和无功功率主要由无源滤波器补偿，而有源滤波器的作用是改善无源滤波器的滤波特性，克服无源滤波器易与电网阻抗发生谐振的缺点。由于无源滤波器被配置为纯调谐，APF 不承受调谐次谐波电压，又因为空心电抗器 L 与双调谐滤波器相比基波阻抗很小，APF 承受电压很低，因此 APF 所需容量可以很小。因此在成本造价上，有源部分的成本可以大大降低，而无源部分的成本并没有增加。

电容器 C 支路首先起到谐波电流分流作用；其次电容器 C 对谐波电流呈容性，而无源滤波器对谐波电流呈感性，谐波电流经过分流后，在三绕组变压器铁芯中产生的谐波磁通相互抵消，未完全抵消的部分再由 APF 产生的补偿电流的磁通进行补偿，这样 APF 的所需容量将进一步降低。同时，电容器 C 对高次谐波呈低阻抗，也能起到高次谐波滤除作用。

当 APF 发生故障时，可以通过快速熔断器，使其迅速脱离滤波系统，而双调谐滤波器还可以正常运行。当双调谐滤波器或电容器 C 发生故障时，断路器 DL 可以使其脱离电网系统，便于检修和维护。

2 APF 投入前系统稳态分析

在 APF 未投入运行时，非调谐次高次谐波单相

等效电路如图 2 所示。谐波电流经过电容器 C、双调谐滤波器、电网阻抗三条支路分流，所以可得：

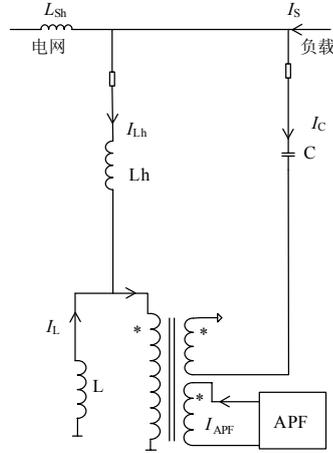


图 2 APF 投入前非调谐次高次谐波单相等效电路
Fig.2 Untuned higher harmonic single-phase equivalent circuit when APF doesn't run

$$\dot{I}_S = \dot{I}_C + \dot{I}_{Lh} + \dot{I}_{Sh} \quad (1)$$

由于三绕组变压器原副边变比 N 为 1 : 1 : 1，可得：

$$\dot{I}_{Sh} X_{Sh} = \dot{I}_{Lh} X_{Lh} - \dot{I}_L X_L = \dot{I}_L X_L - \dot{I}_C X_C \quad (2)$$

对三绕组变压器进行磁路分析，由磁动势 $F = Ni = \dot{\Phi} R_m$ (R_m 为磁路的磁阻) 可得：

$$N(\dot{I}_{Lh} + \dot{I}_L - \dot{I}_C) = \dot{\Phi} R_m \quad (3)$$

设变压器原边电动势为 \dot{E} ，因为变压器原边电压与其并联的空心电抗器 L 电压相等，即

$$\dot{E} = \dot{I}_L X_L \quad (4)$$

由于

$$\dot{E} = -j\omega N \dot{\Phi} \quad (5)$$

将式 (4)、(5) 代入式 (3) 可得：

$$N(\dot{I}_{Lh} + \dot{I}_L - \dot{I}_C) = \frac{\dot{I}_L X_L}{-j\omega N} R_m$$

$$\text{解得} \quad \dot{I}_L = \frac{\dot{I}_{Lh} - \dot{I}_C}{\frac{X_L R_m}{-j\omega N^2} - 1} \quad (6)$$

由于变压器对高次谐波的激磁非常小，所以 R_m 近似于零，即

$$\dot{I}_L = \dot{I}_C - \dot{I}_{Lh} \quad (7)$$

将式 (1) 和式 (7) 代入式 (2) 可得：

$$\begin{cases} (\dot{I}_S - \dot{I}_C - \dot{I}_{Lh}) X_{Sh} = \dot{I}_{Lh} X_{Lh} - (\dot{I}_C - \dot{I}_{Lh}) X_L \\ (\dot{I}_S - \dot{I}_C - \dot{I}_{Lh}) X_{Sh} = (\dot{I}_C - \dot{I}_{Lh}) X_L - \dot{I}_C X_C \end{cases} \quad (8)$$

解式 (8) 可得：

$$\begin{cases} \dot{i}_{Lh} = \frac{(2X_L - X_C)X_{Sh}}{X_{Lh}(X_{Sh} + X_L) - X_C(X_{Sh} + X_{Lh} + X_C) + 4X_L X_{Sh}} I_S \\ \dot{i}_C = \frac{(2X_L + X_{Lh})X_{Sh}}{X_{Lh}(X_{Sh} + X_L) - X_C(X_{Sh} + X_{Lh} + X_C) + 4X_L X_{Sh}} I_S \end{cases} \quad (9)$$

利用 mathematica 分别对支路谐波电流 I_{Lh} 、 I_C 进行分析, 设谐波源产生 5、7、11、13、17、19 次谐波,

$$I_S = 300 \sin(1570t) + 200 \sin(2200t) + 150 \sin(3456t) + 80 \sin(4084t) + 30 \sin(5338t) + 25 \sin(5966t)$$

系统参数如表 1 所示。

表 1 系统参数

Tab.1 System parameters

C_1	30.921 5 μF	C_2	270.563 2 μF
L_1	9.362 0 mH	L_2	1.069 95 mH
C	165.536 μF	L	0.5 mH
L_{Sh}	1 mH		

APF 投入前, I_{Lh} 、 I_C 谐波电流波形如图 3、图 4 所示, 双调谐滤波器支路电流 I_{Lh} 峰值为 300 A, 电容器支路电流 I_C 峰值为 85 A。

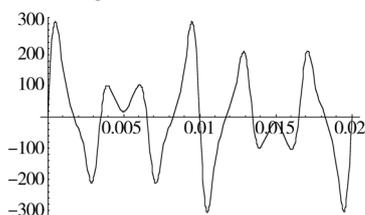


图 3 APF 投入前 I_{Lh} 大小

Fig.3 The size of I_{Lh} when APF doesn't run

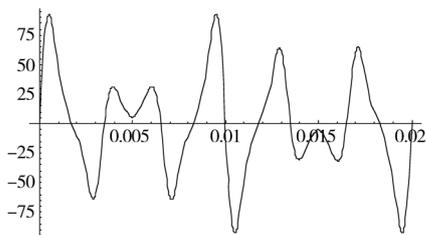


图 4 APF 投入前 I_C 大小

Fig.4 The size of I_C when APF doesn't run

3 APF 投入后系统稳态分析

在 APF 投入稳态运行后, 非调谐次高次谐波单相等效电路同图 2, 谐波电流经过双调谐滤波器、电容器 C 分流, 即:

$$\dot{I}_S = \dot{I}_C + \dot{I}_{Lh} \quad (10)$$

此时相地间谐波电压接近于 0, 设三绕组变压器原副边变比 N 为 1 : 1 : 1, 忽略滤波器的电阻压

降, 在负载谐波完全由滤波器滤除情况下, 由图 2 可得:

$$\dot{I}_{Lh} X_{Lh} = \dot{I}_L X_L = \dot{I}_C X_C \quad (11)$$

由式 (11) 可得:

$$\dot{I}_{Lh} = \frac{X_C}{X_C + X_{Lh}} I_S, \quad \dot{I}_C = \frac{X_{Lh}}{X_C + X_{Lh}} I_S \quad (12)$$

采用 mathematica 对支路谐波电流 I_{Lh} 、 I_C 分析, 结果如图 5、图 6 所示。

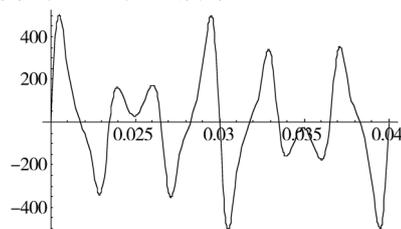


图 5 APF 投入后 I_{Lh} 大小

Fig.5 The size of I_{Lh} after APF runs

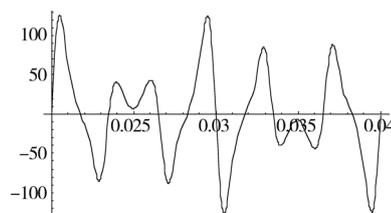


图 6 APF 投入后 I_C 大小

Fig.6 The size of I_C after APF runs

如图 5、6 所示: APF 投入运行后, 双调谐滤波器支路电流 I_{Lh} 峰值由 300 A 增加到 500 A, 电容器支路电流 I_C 峰值由 85 A 增加到 120 A。由此可见, APF 投入运行后, 谐波电流极少流入电网, 大部分经过 I_{Lh} 、 I_C 支路分流。

4 APF 投入系统后所需容量分析

APF 投入运行后有:

$$N(\dot{I}_C - \dot{I}_{Lh} - \dot{I}_L + \dot{I}_{APF}) = \dot{\Phi} R_m \quad (13)$$

$$\dot{I}_L X_L = E = -j\omega N \dot{\Phi} \quad (14)$$

联立式 (13)、(14) 得:

$$N(\dot{I}_C - \dot{I}_{Lh} - \dot{I}_L - \dot{I}_{APF}) = \frac{\dot{I}_L X_L}{-j\omega N} R_m \quad (15)$$

即

$$\dot{I}_{APF} = \frac{X_L R_m}{j\omega N^2} \dot{I}_L + \dot{I}_C - \dot{I}_{Lh} + \dot{I}_L \quad (16)$$

由于变压器对高次谐波的激磁很小, 所以 R_m 近似于零。即:

$$i_{APF} = i_C - i_{Lh} + i_L = \frac{X_C X_L - X_{Lh} X_L - X_C X_{Lh}}{X_L X_{Lh} + X_L X_C} i_S < \frac{X_C - X_{Lh}}{X_{Lh} + X_C} i_S \quad (17)$$

APF 所承受的谐波电压为:

$$\dot{U}_{APF} = i_L X_L = \frac{X_L}{\frac{X_L}{X_C} + \frac{X_L}{X_{Lh}}} i_S = \frac{X_C X_{Lh}}{X_{Lh} + X_C} i_S \quad (18)$$

APF 所需容量为:

$$P_{APF} = \frac{X_C^2 X_{Lh} - X_{Lh}^2 X_C}{(X_{Lh} + X_C)^2} I_S^2 = \frac{X_{Lh} - X_{Lh}^2 / X_C}{(1 + X_{Lh} / X_C)^2} I_S^2 < X_{Lh} I_S^2$$

其中: $X_{Lh} I_S^2$ 为传统并联混合型有源滤波器 APF 所需容量的最小值。

因此, 在 APF 稳态运行情况下, APF 所需容量理论上小于其它形式的并联混合型滤波器。为了验证新型滤波器 APF 所需容量更小, 本文将所提出的新型并联混合型有源滤波器 (图 1, 方案 1) 与传统的并联混合型有源滤波器 (图 7, 方案 2) 在 APF 稳态运行时所需容量进行比较。

传统并联混合型滤波器无源部分也采用双调谐滤波器, 参数与新型滤波器一致。

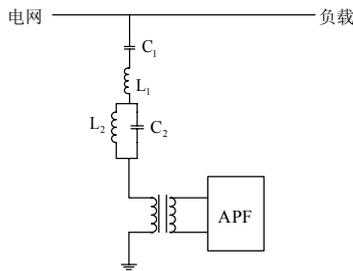


图 7 传统并联混合型有源电力滤波器结构图

Fig.7 Traditional parallel hybrid active power filter structure

表 2 方案 1 和方案 2 APF 所需容量对比

Tab.2 APF capacitance comparison between scheme 1 and scheme 2

谐波次数	谐波大小 /A	方案 1 APF 产生电流 /A	方案 1 APF 承受电压 /V	方案 1 APF 所需容量 /VA	方案 2 APF 所需容量 /VA
5	300	133.5	44.6	-5 954.1	5 838.5
7	200	104.8	42.5	-4 454.0	4 706.0
11	150	27.3	62.6	1 708.9	14 430.6
13	80	5.9	58.8	346.9	9 723.9
17	30	10.5	28.1	295.1	6 211.4
19	25	12.4	24.3	301.3	5 507.5

由以上结果可以看出, 新型有源滤波器在降低非调谐次谐波 (11、13、17、19) APF 所需容

量的效果上, 是非常显著的; 在调谐次谐波 (5、7) APF 所需容量上与传统型滤波器相差不大。

5 APF 的控制方式

本文采用检测相地间谐波电压控制方式。APF 投入稳态运行时, 通过控制 APF, 使电网相地间谐波电压接近于 0。这种控制方式相当于将混合型电力滤波器看成一个可变的谐波阻抗, 它并联在电网上, 通过控制 APF 来调节该谐波阻抗, 当该谐波阻抗对需滤除谐波的阻抗接近于零时, 可以使绝大部分负载谐波电流进入滤波支路而不流入电网。

电压跟踪控制电路采用与参考谐波电压信号比较的瞬时值比较方式, 如图 8 所示。

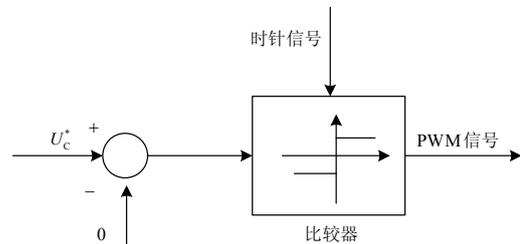


图 8 瞬时值比较控制方式

Fig.8 Control way of instantaneous value comparison

图中 U_c^* 为相地间谐波电压实际值对应信号, 在该方式中, 把相地间谐波电压信号 U_c^* 与 0 进行比较, 两者的偏差 ΔU_c^* 作为滞环比较器的输入, 通过滞环比较器产生控制主电路中开关通断的 PWM 信号, 该 PWM 信号经驱动电路来控制开关器件的通断, 从而达到减小流入电网谐波电流的目的。

6 仿真与实验

利用 Matlab 对单相混合型滤波器投入前后电网电流的谐波含量进行仿真, 仿真电路如图 9 所示, 电路原件参数如表 1 所示。APF 主电路采用电压型 PWM 变流器; 谐波电压检测采用傅立叶离散分析法; 变流器直流侧电压控制采用电容滤波的单相桥式整流电路; 本文用 5、7、11、13、17、19 次电流源代替谐波源; 开关在 0.04 s 时闭合, APF 投入运行。APF 投入前电网电流波形如图 10 所示, APF 投入后电网电流波形如图 11 所示; Scope 为系统谐波检测窗口, 波形如图 12 所示, 图中, 0~0.02 s 时为系统电压波形, 经过一个周期 (0.02 s) 后检测出系统谐波, APF 在 0.04 s 时投入运行, 滤波效果比较理想, 且投入过程比较平稳, 没有引起大的谐波畸变。

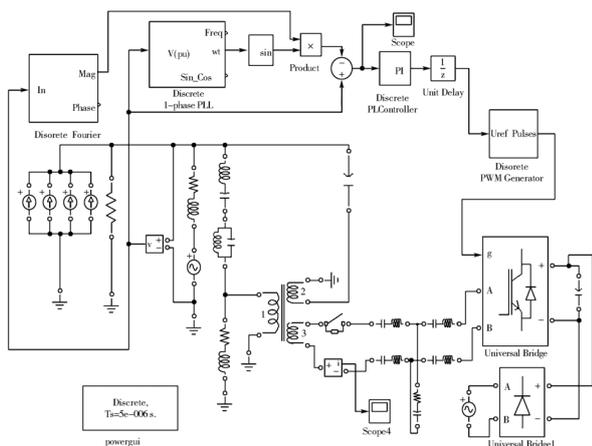


图9 Matlab 单相仿真电路

Fig.9 Matlab single-phase simulation circuit

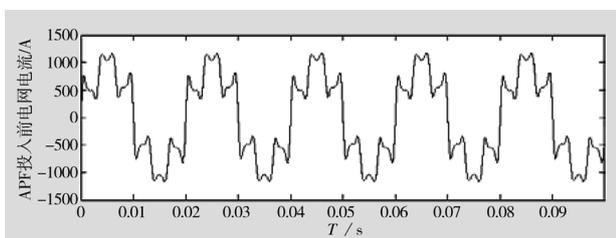


图10 APF投入前电网电流

Fig.10 Current of network when APF doesn't run

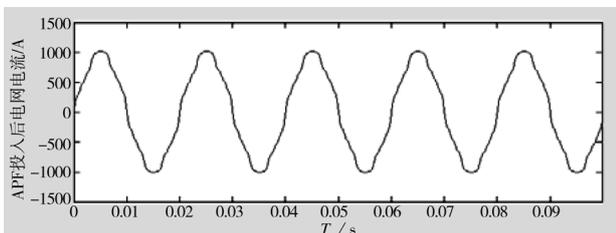


图11 APF投入后电网电流

Fig.11 Current of network after APF run

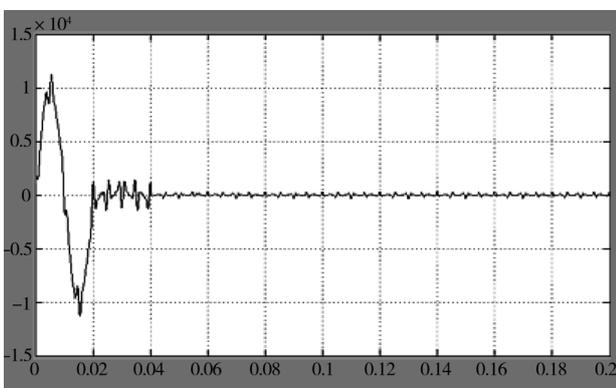


图12 系统谐波仿真窗口

Fig.12 System harmonic simulation window

7 结论

提出了一种基于磁通补偿原理的单相并联型混合有源滤波器, 利用谐波电流通过无源滤波支路与电容器C支路分流, 使变压器铁芯中产生的谐波磁通相互补偿, 使有源滤波器只需产生很小的补偿电流, 从而大大减小有源滤波器的所需容量。仿真结果表明, 新型单相混合滤波器在所需APF容量很小情况下可以取得很好的滤波效果, 具有很高的工程应用价值。

参考文献

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005.
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun. Harmonic Restraint and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 2005.
- [2] 符志平, 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, 37(6): 27-29.
FU Zhi-ping, WANG Yue, YANG Jun, et al. Study on a Novel Single-phase Hybrid Active Power Filter[J]. Electric Power Electronic Technology, 2003, 37(6): 27-29.
- [3] 李达义, 陈乔夫, 贾正春. 一种实用的基于基波磁通补偿的串联混合型有源电力滤波器[J]. 电工技术学报, 2003, 18(1): 68-71.
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun. One Kind Practical Based on Fundamental Wave Magnetic Flux Compensation Series Connected Mixed Active Power Filter[J]. Trans of China Electrotechnical Society, 2003, 18(1): 68-71.
- [4] 范瑞祥, 罗安, 周柯, 等. 并联混合型有源电力滤波器的建模和控制策略分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 55-61.
FAN Rui-xiang, LUO An, ZHOU Ke, et al. Parallel Mixed Active Power Filter's Modelling and Control Policy Analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 55-61.

收稿日期: 2009-02-24; 修回日期: 2009-05-21

作者简介:

李海洋 (1982-), 男, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器、电力电子在电力系统中的应用; E-mail: lihaiyang821129@sohu.com

杨勇 (1977-), 男, 硕士研究生, 研究方向为有源电力滤波器、电力电子在电力系统的应用;

陈杰 (1967-), 男, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及自动化的研发及工程工作。