

直流偏磁和剩磁同时作用下 保护用电流互感器的暂态特性研究

李长云¹, 李庆民¹, 李 贞¹, 姚金霞², 刘 民²

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 山东电力研究院, 山东 济南 250002)

摘要: 电力系统中电磁式电流互感器的暂态特性关系系统的安全稳定运行, 通过建立直流偏磁条件下电流互感器的等效电路模型, 利用基本电磁关系方程导出了剩磁和偏磁对保护用 CT 起始饱和时间和暂态饱和系数影响的定量数值关系。分析表明, 直流偏磁将加速保护用 CT 的饱和, 且偏磁电流越大互感器饱和越快。同时, 剩磁与偏磁共同作用使得暂态饱和系数增大, 如不考虑其变化, 选择的 CT 可能不能满足偏磁条件下系统对 CT 的要求。通过仿真验证了理论分析结果的正确性。该研究为保护用 CT 的选择、继电保护的整定提供了参考依据。

关键词: 电流互感器; 直流偏磁; 剩磁; 起始饱和时间; 暂态面积系数

Research on the transient characteristics of the protective CTS with co-impacts of DC bias and remnant flux

LI Chang-yun¹, LI Qing-min¹, LI Zhen¹, YAO Jin-xia², LIU Min²

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. EPRI of Shandong, Jinan 250002, China)

Abstract: The transient characteristics of protective electromagnetic current transformers are pivotal factors to ensure the stability of power systems. Equivalent circuit models of electromagnetic type protective CTs are established with DC bias. Combined with electromagnetic equations, the co-impacts from both DC bias and remnant flux on the time-to-saturation and the transient factor of protective CTs are deduced with quantitatively numerical expressions being given. The analysis indicates that the DC bias current will accelerate saturation of the protective CTs up to several milliseconds, and the CTs will saturate more quickly while the DC current becomes larger. In the meanwhile, the transient factor will be enlarged by the co-impacts, which results in that the selected CT won't fulfill the system demands. Simulations are presented to verify the above analyzed results. The proposed research presents useful reference for proper selection of protective CTs as well as reliable setting of corresponding relay device in power systems.

Key words: current transformer; DC bias; remnant flux; time-to-saturation; transient dimensioning factor

中图分类号: TM452 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)23-0107-05

0 引言

当双极高压直流输电线路检修, 或单极故障需以单极-大地回线方式运行时, 将有直流电流通过中性点直接接地的变压器进入交流系统, 出现直流偏磁现象^[1-2]。此外, 地磁暴效应产生的地磁感应电流(GIC)也可引起变压器的直流偏磁效应^[3]。二者皆可给电力系统的中性点直接接地变压器带来危害^[4]。

直流偏磁对电磁式电流互感器(CT)也会产生类似的影响。有学者开展了这方面的初步研究^[5-6], 但未能给出偏磁电流与 CT 起始饱和特性之间的量化关系, 也没有考虑剩磁的具体影响。

铁芯中的剩磁可加速 CT 的暂态饱和^[7-8], 当直流偏磁与剩磁共同作用时, 电磁式 CT 能否正确传变一次电流是继电保护装置可靠动作的前提, 也是电力系统安全稳定运行的保证。因此, 研究直流偏磁和剩磁同时存在时保护用 CT 的暂态特性, 探明其影响方式, 对进一步研究预防和治理措施具有重要意义。

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 (NCET-08-0335)

本文以 TP 级 CT 为例, 结合其数学模型, 对直流偏磁与剩磁同时作用下的励磁磁通进行求解, 推导出 CT 起始饱和时间及暂态面积系数的数学表达式, 最后通过仿真研究验证了结论的正确性。

1 等效分析模型

(1) 直流偏磁条件下的等效分析模型

图 1 (a) 为直流偏磁电流在交流系统中的示意图, 偏磁电流经变压器 T_1 的中性点流入, 由输电线路流经变压器 T_2 的中性点入地。图 1 (b) 为单相等值电路, 其中: u_{ac} 为交流系统单相电压; I_{dc} 为偏磁电流; Z_s 、 Z_B 分别为系统阻抗和负载阻抗。

当系统发生短路故障时, 若电源电压 $u_{ac} = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \theta)$, θ 为故障相位, $\theta = 0^\circ$ 时短路电流全偏移, 故障电流对 CT 影响最大, 则 CT 一次侧电流为:

$$i_p = I_{dc} + I_f (-\cos \omega t + e^{-\frac{t}{T_1}}) \quad (1)$$

式中: I_f 为无偏磁时故障电流稳态峰值; T_1 为系统的一次时间常数。

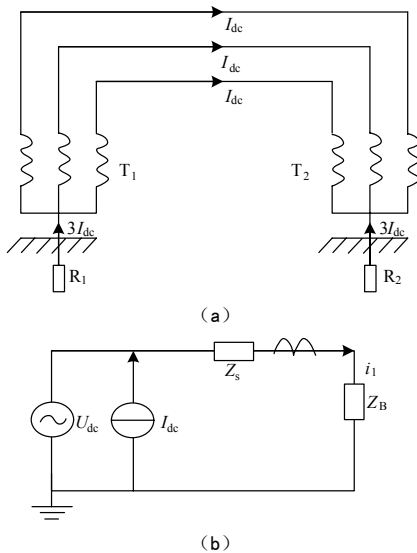


图 1 直流偏磁分析等值电路

Fig.1 Equivalent circuit for DC bias analysis

当系统参数已知时, 据式 (1) 求出 CT 的一次侧电流值, 进而可结合 CT 等效电路求出其励磁磁通以分析偏磁电流的影响。

(2) CT 等效模型

研究保护用 CT 的暂态特性时, 重点在于考察其在大电流下到达饱和的时间, 且为进行解析分析, 故作如下假设:

① CT 未饱和时, 其励磁特性视为线性特性;

② 忽略二次漏抗、负荷电抗及铁芯损耗。

则电磁式 CT 的等效电路和励磁特性如图 2 所示。图 2 (a) 中 i_1 、 i_2 、 i_e 分别为折算到二次侧的一次电流、二次电流、励磁电流, R_b 为 CT 二次侧总电阻。图 2 (b) 为暂态时 CT 的励磁特性, 图中 N 为饱和点, B_s 、 H_s 分别为饱和磁密、饱和磁场强度, 记未饱和时 (ON 段) 的等效电感为 L_e 。

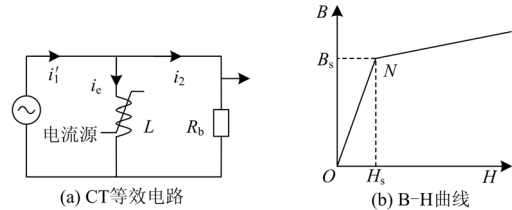


图 2 CT 等效电路和励磁特性

Fig.2 Equivalent circuit and excitation characteristics of CT

若 CT 的额定电流比为 $K_n = N_2/N_1$, N_1 、 N_2 分别为 CT 一次、二次侧绕组匝数, 则折算到二次侧的一次电流为 $i_1' = i_p/K_n$ 。由图 2 (b), CT 的二次时间常数为 $T_2 = L_e/R_b$ 。设 CT 的励磁磁通为 ϕ , 则 CT 的基本方程为:

$$\frac{d\phi}{dt} + \frac{1}{T_2}\phi = R_b i_1' \quad (2)$$

将式 (2) 与式 (1) 联立, 可求得 CT 的励磁磁通, 进而可分析其暂态特性。

2 直流偏磁条件下保护用 CT 暂态特性

(1) CT 励磁磁通

突然开断较大的故障电流时, CT 铁芯中会出现剩磁, 记为 ϕ_r , 则由式 (2) 可解得 CT 的励磁磁通为:

$$\phi = \frac{L_e I_{dc}}{K_n} + \frac{L_e I_f}{K_n} \frac{T_1}{T_1 - T_2} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) + \quad (3)$$

$$\frac{L_e I_f}{K_n} \frac{e^{-\frac{t}{T_2}} - \cos \omega t - \omega T_2 \sin \omega t}{1 + \omega^2 T_2^2} + \phi_r e^{-\frac{t}{T_2}}$$

令 $\phi_{dc} = L_e I_{dc}/K_n$ 、 $\phi_m = L_e I_f / (\omega T_2 K_n)$ 分别表示偏磁电流产生的直流磁通和故障电流产生的交流磁通稳态峰值, 且一般满足 $\omega^2 T_2^2 \gg 1$, 又因闭合铁芯的

CT 满足 $T_2 \gg T_1$, 故 $e^{-\frac{t}{T_2}}$ 在一个周期内衰减较慢, 则式 (3) 可化为:

$$\phi = \phi_{dc} + \phi_r + \phi_m \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{-\frac{t}{T_1}} - e^{-\frac{t}{T_2}}) - \sin \omega t \right] \quad (4)$$

由式 (4) 可知, 直流偏磁电流产生的恒定磁通将成为部分励磁磁通, 当存在剩磁时, 二者共同作用更容易使 CT 出现暂态饱和。

(2) CT 的暂态饱和特性

起始饱和时间是 CT 暂态特性的重要指标, 是继电保护装置选择和整定需考虑的参数。为便于表达, 作如下定义。

1) CT 的饱和系数 K_s : $K_s = \phi_s / \phi_m$, ϕ_s 为铁芯的实际饱和磁通。 K_s 表征铁芯饱和的难易程度, K_s 值越大, 铁芯越不易饱和。 K_s 一般在 2~9 之间。

2) 直流偏磁系数 K_{dc} : $K_{dc} = \phi_{dc} / \phi_s$ 。 K_{dc} 表征直流偏磁效应的影响程度, K_{dc} 可取正或负值, 取决于 ϕ_{dc} (I_{dc}) 的方向, $K_{dc} > 0$ 为正向偏磁, $K_{dc} < 0$ 则为反向偏磁。 K_{dc} 一般在 0.5 以下。

3) 剩磁系数 K_r : $K_r = \phi_r / \phi_s$ 。剩磁系数通常小于 0.8^[8]。

式 (4) 中令 $\phi = \phi_s$, 且等式两边同时除以 ϕ_m , 得到:

$$(1 - K_r - K_{dc})K_s = \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{T_2}}) - \sin \omega t \quad (5)$$

令 $A = 1 - K_r - K_{dc}$, 它综合表征了剩磁和偏磁对 CT 饱和特性的整体影响, 则式 (5) 可表示为式 (6)。

$$f(AK_s, t_s) = 0 \quad (6)$$

由 A 的定义可知, 剩磁与偏磁均可视为通过影响 CT 的饱和系数进而影响其起始饱和时间。而 K_r 和 K_{dc} 本身的方向与大小不同, 使得 CT 的起始饱和时间变得复杂化。求解式 (6) 即可获得饱和系数、直流偏磁系数以及剩磁系数对 CT 起始饱和时间的综合影响。

图 3 为 CT 在 $A=0, 0.6$ ($K_r=K_{dc}=0.2$)、1.4 ($K_r=K_{dc}=-0.2$) 时饱和系数与时间的关系曲线。由图 3 可知: 若饱和系数等于 5, 当 $A=1$ ($K_{dc}+K_r=0$) 时, 起始饱和时间 t_s 约为 16 ms; 而 $A=0.6$ ($K_{dc}=K_r=0.2$) 时, t_s 约为 10.1 ms; 当 $A=1.4$ ($K_{dc}=K_r=-0.2$) 时, t_s 约为 32 ms。 A 越小 (即 K_{dc} 和 K_r 同为正且值越大), t_s 越短; A 越大 (即 K_{dc} 和

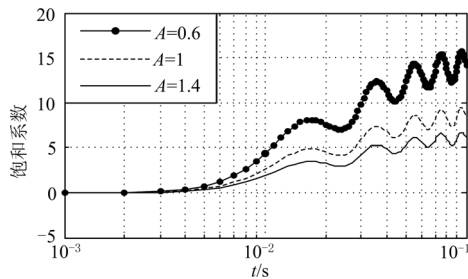


图 3 饱和系数与时间的关系曲线

Fig.3 Relationship between saturation factor and time-to-saturation

K_r 同为负且值越大), t_s 越大。对同一 CT, 饱和系

数较大, K_{dc} 和 K_r 同为负且值较大时, CT 可能不饱和。

(3) 直流偏磁时 CT 的暂态面积系数

CT 的暂态面积系数 K_{td} , 表征考虑短路电流的暂态过程时, TP 类 CT 的铁芯较 P 类 CT 铁芯增大的倍数^[7], 此处仅需考虑正向偏磁与正向剩磁情况。

暂态系数 K_{td} 为磁通密度与磁通密度峰值之比。在直流偏磁条件下, 由式 (4) 可得:

$$K_{td} = \frac{\phi/S}{\phi_m/S} = K_{dc}K_s + K_rK_s + \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{T_2}}) - \sin(\omega t) \quad (7)$$

其中: S 为 CT 铁芯面积。由标准可知^[9], 令式 (7) 中的 $\sin \omega t = -1$, 即为全偏移短路电流, 在 C-t-O 循环时所需的暂态面积系数, 即

$$K_{td} = K_{dc}K_s + K_rK_s + \frac{\omega T_1 T_2}{T_1 - T_2} (e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{T_2}}) + 1 \quad (8)$$

由式 (8) 可知, 因剩磁与直流偏磁的存在, 暂态面积系数应增加 $K_{dc}K_s + K_rK_s$ 。如不考虑暂态面积系数的变化, 选择的 CT 可能不能满足偏磁条件下系统对 CT 的要求。

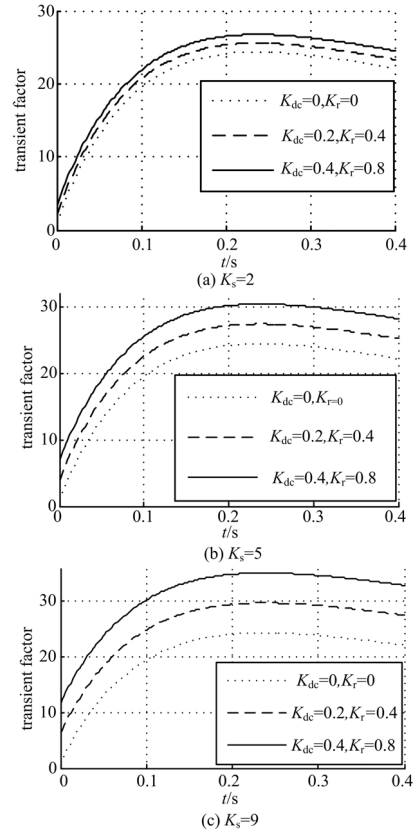


图 4 暂态系数与偏磁、剩磁的关系

Fig.4 Relationship of transient factor with DC bias and remnant factors

图 4 的暂态系数曲线, 针对一发电机变压器组

差动保护用 TPY 级 CT (参数为: $K_n=2500/1$, $T_1=0.1$ s, $T_2=0.8$ s), 其工作循环为 C-0.1s-O, 饱和系数分别为 2、5、9, 偏磁分别为 0、0.2、0.4, 剩磁系数为 0、0.4、0.8。图中曲线的最大值即为相应条件下 CT 的暂态面积系数。

由图 4 可知, 当 $K_{dc}=0.2$ 、 $K_r=0.4$ 时, 随着饱和系数的增大, 暂态面积系数由 25 增至 30; 当 $K_{dc}=0.4$ 、 $K_r=0.8$ 时, 暂态面积系数则相应由 26 增至 35, 故在选择 CT 时必须考虑剩磁及直流偏磁对暂态面积系数的影响。

3 仿真研究

某 500 kV 输电线路, 额定电流为 1 kA, 负载功率因数为 0.9; 系统在 0.2 s 时刻发生短路, 预期短路电流为 10 kA (热稳定电流有效值); CT 额定电流比 1000 A/5 A, 二次侧接有 1 Ω 的电阻性负荷, CT 时间常数分别为 $T_1=0.03$ s, $T_2=1.0$ s, 饱和系数为 2。

给定一组偏磁系数和剩磁系数, 可由 Newton-Raphson 等方法求解非线性方程式 (5), 所得结果如表 1 所示。

表 1 电流互感器起始饱和时间

Tab.1 Time-to-saturation of CTs

剩磁系数	偏磁系数	起始饱和时间/ms
0	0	209.1
0	0.2	208.3
0	-0.2	209.9
0.2	0.2	207.4
0.2	-0.2	209.1
-0.2	-0.2	209.1
-0.2	-0.2	210.7

注: *表中 $K_{dc}=0.2$ 时对应偏磁电流为 20 A。

根据上述参数, 利用 Matlab/Simulink 搭建仿真电路, 采用带磁滞回环特性的 CT 模型, 仿真结果如图 5~7 所示。

图 5 为无剩磁时 CT 在不同偏磁条件下的一次电流 (折算到二次侧) 和二次电流的比较。图 6 和图 7 分别给出了剩磁系数分别为 0.2、-0.2 时, CT 在不同偏磁电流作用下的一次电流 (折算到二次侧) 和二次电流。

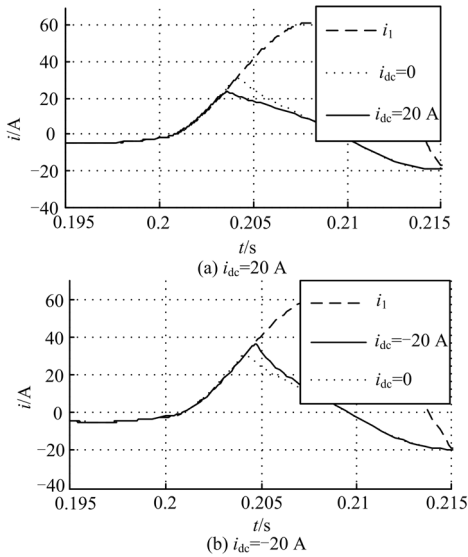


图 5 无剩磁时 CT 的一次和二次电流

Fig.5 CTs' primary and secondary currents without remnant flux

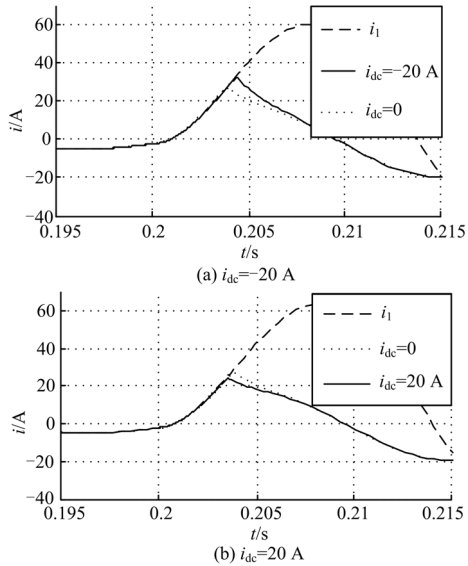
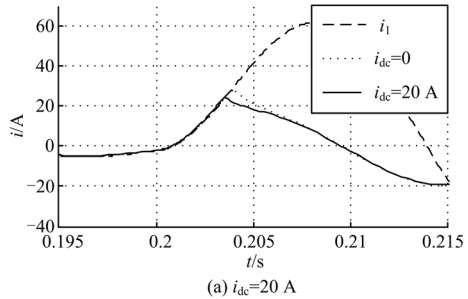


图 6 剩磁系数为 0.2 时 CT 的一次和二次电流

Fig.6 CTs' primary and secondary currents with $K_r=0.2$



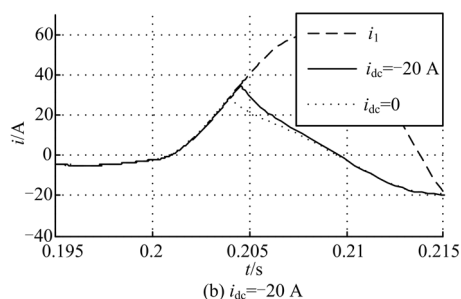


图7 剩磁系数为-0.2时CT的一次和二次电流

Fig.7 CTs' primary and secondary currents with $K_r = -0.2$

由图5可知,与无偏磁时相比,反向偏磁电流(-20 A)将延缓CT的饱和(约1 ms),而正向偏磁电流(20 A)则使得CT饱和加速(约1 ms),这与第3节的理论分析结果相一致。

分别将图6、图7与图5比较可知,正向剩磁($K_r = 0.2$)时可使CT起始饱和时间缩短约1 ms,反向剩磁($K_r = -0.2$)时可使CT起始饱和时间延长约0.5 ms;剩磁和偏磁同为正向(见图6(b))时,CT起始饱和时间缩短约2 ms,同为反向(图7(b))时,CT起始饱和时间延长约1 ms;剩磁和偏磁方向相反(见图6(a)和图7(a))时,二者的影响有一定的抵消作用。

4 结论

1) 基于保护用CT的等效电路并结合CT的基本电磁方程,导出了直流偏磁及剩磁作用下CT起始饱和时间的通用计算公式,应用此公式可综合分析偏磁电流与剩磁对CT起始饱和时间的交互影响程度。仿真示例佐证了部分理论分析结果。

2) 偏磁的影响与剩磁有一定类似性,二者皆通过影响CT的饱和系数来影响CT的起始饱和时间。可用补偿系数综合表征直流偏磁与剩磁对CT起始饱和时间的影响。同时,二者的作用使得CT的暂态面积系数增大。

3) 本文研究结果可为电力系统中保护用CT的选择以及继电保护装置的整定提供参考依据。

参考文献

- [1] 赵畹君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
ZHAO Wan-jun. HVDC transmission engineering technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [2] YAO Ying-ying, Koh Chang Seop, NI Guang-zheng, et al. 3-D Nonlinear transient eddy current calculation of

- online power transformer under DC bias[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2005, 41 (5): 1840-1843.
- [3] Price P R. Geomagnetically induced current effects on transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17 (4): 1002-1008.
- [4] 朱艺颖, 蒋卫平, 曾昭华, 等. 抑制变压器中性点直流电流的措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (13): 1-7.
ZHU Yi-ying, JIANG Wei-ping, ZENG Zhao-hua, et al. Studying on measures of restraining DC current through transformer neutrals[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (13): 1-7.
- [5] LI Chang-yun, LI Qing-min, HUANG Jin-xin, et al. Research on the temporary performance of the protective current transformers with DC bias excitation[C]. //UPEC2009. Glasgow, Scotland, UK: 2009.
- [6] LI Chang-yun, LI Qing-min, Yao Jin-xia, et al. The characteristics of electromagnetic current transformers with DC bias[C]. //2009 SUPERGEN Conference Provisional Proceedings. Nanjing(China): 2009.
- [7] 袁季修, 盛和乐. 电流互感器的暂态饱和及应用计算[J]. 继电器, 2002, 30 (2): 1-5.
YUAN Ji-xiu, SHENG He-le. The transient saturation of current transformer and its application calculation[J]. Relay, 2002, 30 (2): 1-5.
- [8] 钱家骊, 关永刚, 徐国政, 等. 剩磁对保护型电磁式电流互感器误差影响的仿真研究[J]. 高压电器, 2005, 41 (1): 26-28.
QIAN Jia-li, GUAN Yong-gang, XU Guo-zheng, et al. Simulation and analysis of error of protective type CT due to residual magnetism[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41 (1): 26-28.
- [9] 中国电器工业协会全国互感器标准化技术委员会. GB16847-1997[S]. 北京: 中国标准出版社, 1997.
National Standardization Technical Committees of transformer. GB16847-1997[S]. Beijing: China Standard Press, 1997.

收稿日期: 2009-12-07; 修回日期: 2010-01-31

作者简介:

李长云(1974-), 男, 讲师, 博士生, 主要从事直流偏磁、铁磁非线性及其治理技术方面的研究工作; E-mail: lcy4429@163.com

李庆民(1968-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事高电压与绝缘技术、应用电磁学等方面的科学研究工作;

李贞(1986-), 女, 硕士生, 从事变压器直流偏磁与抑制技术方面的研究工作。