

基于MPPT的无线充电负载位置前端监测

陈宏亮, 林苏斌, 陈为

福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108

摘要: 设计了一种锥形线圈排布方式, 通过理论分析, 提出了基于sepic电路的最大功率跟踪(MPPT)策略。在此基础上, 进一步提出了基于自适应控制算法的负载位置前端监测系统。通过发射侧的信号采集, 便能有效实现对负载位置的实时准确监测。最后设计了实验样机, 验证了系统的可行性。

关键词: 无线充电, 全方向, MPPT, 负载位置监测, 前端监测

Front-end monitoring of wireless charging load position based on MPPT

CHEN HONG LIANG, LIN SU BIN, CHEN WEI

College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108

Abstract: A conical coil arrangement method is designed. Through theoretical analysis, the maximum power tracking (MPPT) strategy based on sepic circuit is proposed. On this basis, a load position front-end monitoring system based on adaptive control algorithm is proposed. Through the signal acquisition on the transmitting side, the real-time and accurate monitoring of the load position can be realized effectively. Finally, an experimental prototype is designed to verify the feasibility of the system.

Keywords: Omnidirectional, MPPT, Load position monitoring, Front-end monitoring

0 引言

相对于有线充电, 无线充电更便捷, 安全性也更高, 全方向无线充电是小功率无线充电领域的发展趋势, 也是目前企业界和学术界研究的热点。^[1]文献[2]提出了利用旋转发射磁场来实现全方向无线充电, 系统可以实时跟踪负载的位置, 但控制电机的引入无疑增大了系统的复杂度, 体积重量有所增加, 同时机械结构降低了系统寿命。文献[3]提出了采用两个发射线圈正交的结构, 通过控制线圈中的相位构造旋转磁场, 可以实现全方向, 但未对磁场进行精准定位, 且二维线圈结构自由度不高, 输出功率和效率受限。文献[4]在二维正交线圈基础上提出了单一闭合线圈结构, 在XY平面内提高了传输距离和效率, 但在Z方向不具有自由度。麻省理工学院在文献[5]提出了基于“波束成形”的全方向无线充电控制算法, 通过调整6个平放的平面螺旋形发射线圈的电流幅值和相位来实时跟踪负载位置的变

化, 使磁场精准定位, 然而由于负载的监测需要接收侧与发射侧进行无线通信, 因此增加了系统控制的复杂度, 并且无线通信的损耗影响了系统效率, 不适用于小功率的无线充电系统。香港大学许树源团队成果颇丰, 文献[6]-[9]提出了三维正交线圈结构, 采用分时复用, 调整发射线圈中的电流幅值相位来监测负载和互感, 但分时复用无疑降低了充电速度, 同时对互感和负载的监测需要进行后端监测。文献[10]提出了一种负载和互感的前端监测系统, 但是要求采用SS补偿方式, 并且不能工作在谐振频率附近, 使得系统输出功率大大降低。

本文针对这一现状, 在对全方向无线充电系统进行了综合分析的基础上, 提出了一种根据负载位置自适应选通发射线圈, 通过判定每个发射线圈中的电流幅值大小即可准确判断负载位置, 进而导通相应线圈。文章分四个部分阐述: 第一部分提出了一种全方向无线充电线圈方案, 并

对发射线圈组和接收线圈进行建模分析，计算了不同发射线圈对接收线圈的互感；第二部分根据阻抗匹配的原理，提出了基于 sepic 电路的最大功率跟踪策略；第三部分提出了基于 MPPT 的负载位置前端监测系统，仅通过监测发射侧电流的幅值即可判断负载位置，并导通相应发射线圈；第四部分制作了实验样机，测试效果良好。

1 锥形线圈排布方案的分析与设计

无线充电最核心的硬件部分是线圈。在全方向无线充电设计中，线圈结构和排布方式设计的合理与否不仅会影响输出功率和效率，而且会影响全方向的实现。对于线圈结构，目前无线充电应用最广的是平面螺旋线圈结构，本设计也将采用平面螺旋线圈结构。然而，线圈的排布方式也是实现全方向的关键，例如当多个平面螺旋线圈位于同一平面时，将易使磁场存在死角。为了使磁场无死角，本文将采用四个发射线圈，呈锥状排布，分别位于四侧，每个线圈相差 90 度，线圈与 XOY 平面均呈 45 度角。系统每次导通其中一个线圈，磁场将覆盖所有方向。

线圈排布方式的正视图如图 1 所示，俯视图如图 2 所示。

为了简化分析，假设四个线圈均为 1 匝，半径为 R，圆心坐标分别为 $(s, 0, 0)$, $(-s, 0, 0)$, $(0, s, 0)$, $(0, -s, 0)$ ，则四个圆的参数方程分别为：

$$L_{TX1} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} s \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$L_{TX2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & -\frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -s \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$L_{TX3} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -s \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$L_{TX3} = \begin{pmatrix} \frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\frac{\sqrt{2}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} R \cos \theta \\ R \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -s \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

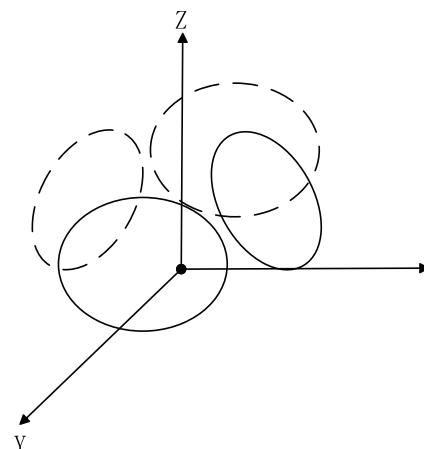


图 1 线圈排布方式正视图

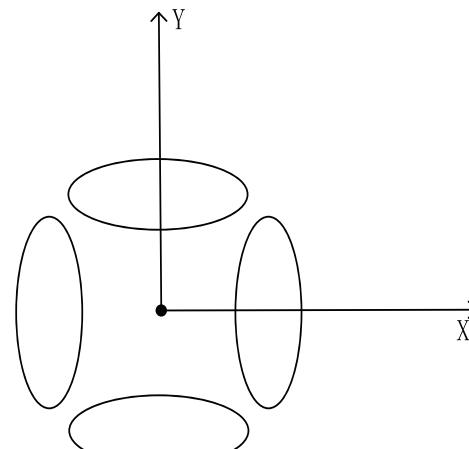


图 2 线圈排布方式俯视图

接收线圈采用矩形线圈结构，长为 a 宽为 b，则根据空间旋转与平移的相关原理，对应的接收侧矩形线圈的参数方程为：

$$L_{RX} = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Lx_{kc} + (Lx_{kc+1} - Lx_{kc}) \cdot t \\ Ly_{kc} + (Ly_{kc+1} - Ly_{kc}) \cdot t \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中：

$$\left\{ \begin{array}{l} Lx_0 = \frac{-a}{2}, Ly_0 = -\frac{b}{2} \\ Lx_1 = \frac{-a}{2}, Ly_1 = \frac{b}{2} \\ Lx_2 = \frac{a}{2}, Ly_2 = \frac{b}{2} \\ Lx_3 = \frac{a}{2}, Ly_3 = -\frac{b}{2} \\ Lx_4 = Lx_0, Ly_4 = Ly_0 \end{array} \right. \quad (3)$$

由聂依曼公式便可得到每个发射线圈与接收线圈的互感。由于发射线圈每次只导通一个，因此不需要考虑发射线圈之间的互感。

$$\begin{aligned} M_{TX1-RX} &= \frac{u_0}{4\pi} \cdot \sum_{kc=0}^3 \int_0^{1/2\pi} \frac{dL_{TX1} \cdot dL_{RX}}{|L_{TX1} - L_{RX}|} d\theta dt \\ M_{TX2-RX} &= \frac{u_0}{4\pi} \cdot \sum_{kc=0}^3 \int_0^{1/2\pi} \frac{dL_{TX2} \cdot dL_{RX}}{|L_{TX2} - L_{RX}|} d\theta dt \\ M_{TX3-RX} &= \frac{u_0}{4\pi} \cdot \sum_{kc=0}^3 \int_0^{1/2\pi} \frac{dL_{TX3} \cdot dL_{RX}}{|L_{TX3} - L_{RX}|} d\theta dt \\ M_{TX4-RX} &= \frac{u_0}{4\pi} \cdot \sum_{kc=0}^3 \int_0^{1/2\pi} \frac{dL_{TX4} \cdot dL_{RX}}{|L_{TX4} - L_{RX}|} d\theta dt \end{aligned} \quad (4)$$

发射线圈的合理排布使系统能够实现全方向无线充电，然而，为了提高输出功率，需要在接收侧进行负载匹配，以实现最大功率跟踪。

2 基于 sepic 电路的 MPPT 控制

由于 sepic 电路通过调节占空比便可使等效电阻从 0

到正无穷全范围变化，适用于任意阻抗的匹配，因此是比较理想的阻抗匹配方式。本设计也将采用 sepic 电路实现最大功率输出。下图是本系统的简单电路示意图。

当负载电阻为 R_0 时，根据 SEPIC 电路的性质可得 1-1' 向右看的等效电阻为：

$$R_{1-1'} = \frac{(1-D)^2 R_0}{D^2} \quad (5)$$

则从 2-2' 看进去的电阻可近似等效为：

$$R_{2-2'} = \frac{R_{1-1'}}{1.2^2} = \frac{(1-D)^2 R_0}{1.2^2 D^2} \quad (6)$$

于是系统的电路拓扑简化为：

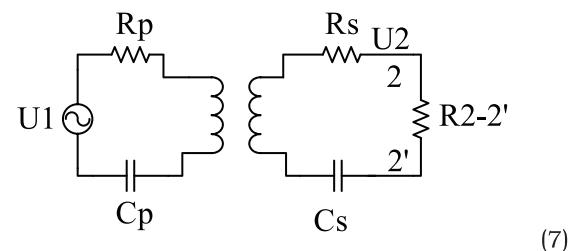


图 4 系统简化电路拓扑

由于整流桥和 BOOST 电路损耗较低，可以认为 $R_{2-2'}$ 上的功率即为输出功率。则输出功率为：

$$\begin{aligned} P_0 &= \frac{\omega^2 M^2 U_1^2 R_{2-2'}}{\left[R_p (R_s + R_{2-2'}) + \omega^2 M^2 \right]^2} \\ &= \frac{\omega^2 M^2 U_1^2 \frac{(1-D)^2 R_0}{1.2^2 D^2}}{\left[R_p \left(R_s + \frac{(1-D)^2 R_0}{1.2^2 D^2} \right) + \omega^2 M^2 \right]^2} \end{aligned} \quad (8)$$

做出 P_0 与 D 的关系曲线如下：

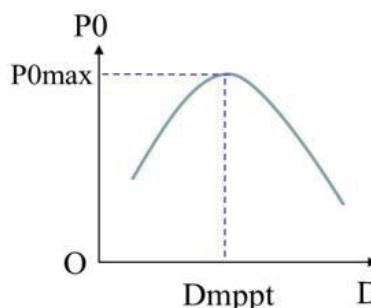


图 5 输出功率与占空比的关系

当

$$D = \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1.2^2(R_p R_s + \omega^2 M^2)}{R_p R_0}}} \quad (9)$$

时, P_0 取得最大值。由于

$$0 < \frac{1}{1 + \sqrt{\frac{1.2^2(R_p R_s + \omega^2 M^2)}{R_p R_0}}} < 1 \quad (10)$$

所以通过调节占空比即可实现 MPPT。算法流程图如下:

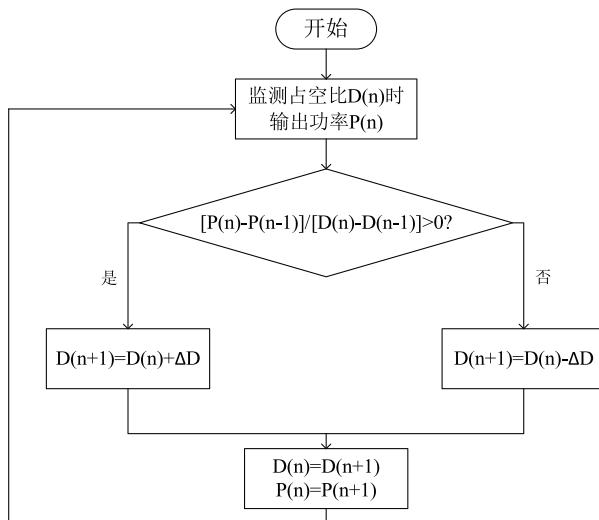


图 6 MPPT 控制算法流程图

3 负载位置前端监测系统

设发射线圈与接收线圈自感分别为 L_p 、 L_s , 植合系数为 k , 发射线圈电流为 I_1 , 则由式 8 可知:

$$P_0 = \frac{\omega^2 L_p L_s U_1^2 k^2}{4R_p(R_p R_s + \omega^2 L_p L_s k^2)} = \frac{\omega^2 L_p L_s U_1^2}{4R_p(\frac{R_p R_s}{k^2} + \omega^2 L_p L_s)} \quad (11)$$

$$I_1 = \frac{U_1(2R_p R_s + \omega^2 L_p L_s k^2)}{2R_p(R_p R_s + \omega^2 L_p L_s k^2)} = \frac{U_1}{2R_p} + \frac{U_1 R_s}{2(\omega^2 L_p L_s k^2)} \quad (12)$$

由公式可知, P_0 随 k 的增大而增大, I_1 随 k 的增大而变小, 取 $R_p=R_s=5\Omega$, $f=6.78\text{MHz}$, $L_p=25\mu\text{H}$,

$L_s=17.5\mu\text{H}$, 做出 P_0 和 I_1 与 k 的关系曲线分别如下:

显然, 由于 P_0 随 k 的增大而增大, 因此需要导通 k 最大的线圈。由于 I_1 随 k 的增大而减小, 因此我们可以监测 I_1 的大小来判断 k 的大小, I_1 越小说明 k 值越大。

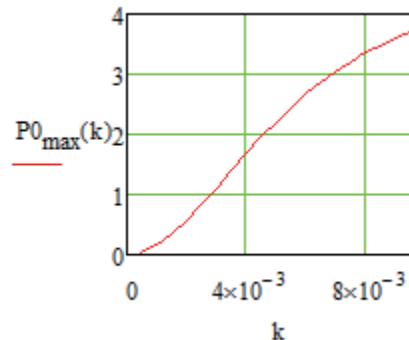


图 7 最大输出功率与耦合系数的关系

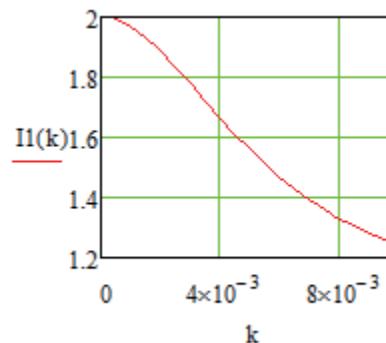


图 8 发射线圈电流与耦合系数的关系

因此, 本文提出以下控制方案:

第一步: 给定输入电压, 轮流导通 n 个发射线圈, 分别监测此时的发射线圈电流, 得到 I_{11} 、 I_{12} 、 I_{13} 、…、 I_{1n} ;

第二步: 比较 I_{11} 、 I_{12} 、 I_{13} 、…、 I_{1n} , 导通具有最大电流值时的线圈, 即: 若 $I_{1i}=\max(I_{11}, I_{12}, \dots, I_{1n})$, 则导通第 i 个线圈。

前端控制的具体电路图和控制流程图如图 9、图 10 所示:

通过这样的控制方案, 可在负载位置变化时进行实时的前端监测, 选通具有最大耦合系数的线圈, 从而监测负载的位置。

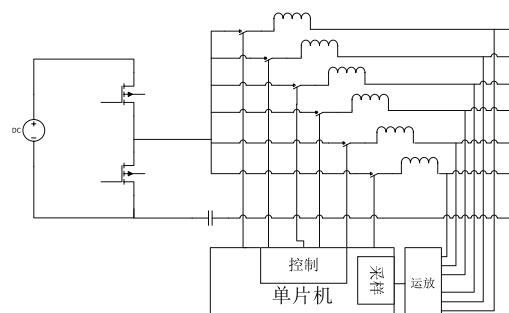


图 9 前端控制电路图

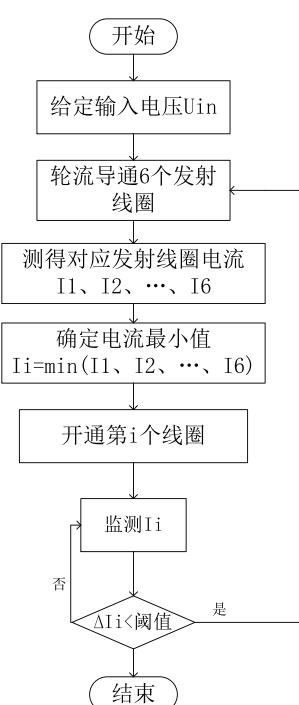


图 10 前端控制流程图

4 实验验证

由于判断导通的决定因素是耦合系数引起的电流大小比较，因此为了验证本方案的可行性，只需验证电流对耦合系数的敏感性。我们搭建了单线圈平台，通过改变接收线圈与发射线圈的距离来调节耦合系数，并测量接收线圈与发射线圈的距离逐渐变大时对应的发射侧电流变化。

本文搭建了一个频率 6.78MHz 的无线充电系统，输入 10V，通过调节发射线圈与接收线圈的距离，测量发射线圈的电流波形。

实测得到发射线圈与接收线圈正对与斜对时，距离分

别为 2cm、4cm、6cm、8cm、10cm 时发射侧电流峰峰值与距离的关系为表一、表二。

表一 正对时电流峰峰值与距离的关系

TX 与 RX 正对时中心距离	发射侧线圈电流峰峰值
2cm	191mA
4cm	569mA
6cm	1.09A
8cm	1.36A
10cm	1.41A

表二 斜对时电流峰峰值与距离的关系

TX 与 RX 斜对时中心距离	发射侧线圈电流峰峰值
2cm	266mA
4cm	769mA
6cm	1.36A
8cm	1.47A
10cm	1.56A

分别作出正对与斜对时电流峰峰值与距离的曲线为：

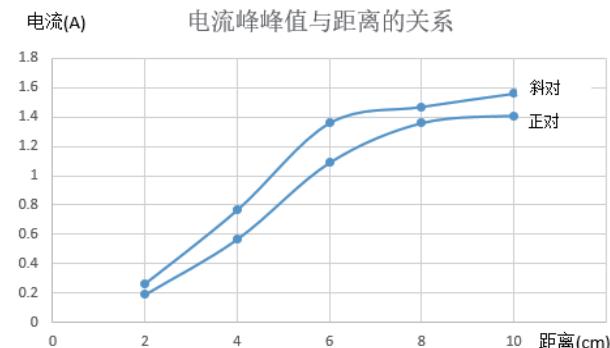


图 11 电流峰峰值与距离的关系曲线

从图中可以看出随着距离增加，即耦合系数减小时，电流峰峰值增加，因此这与我们的前述分析是一致的。基于这种结论，我们便能根据电流的大小判断不同线圈耦合系数的大小，电流幅值越小说明该发射线圈对接收线圈的耦合系数越大。而根据前述分析，耦合系数越大输出功率越大，因此，电流幅值越小输出功率将越大。通过判定电流幅值大小即可判断选通哪个线圈，实现最大功率输出。该监测系统是实现全方向无线充电的基础。

5 结论

本文针对目前全方向无线充电后端监测方式的局限性，提出了基于 MPPT 的前端监测控制策略。首先监测不同发射线圈的电流幅值，接着判定电流幅值大小，通过自

适应算法选通能实现最大功率输出的线圈。通过实验验证了系统可行性，为实现全方向无线充电提供了基础。

参考文献

- [1] 范兴明, 莫小勇, 张鑫. 无线电能传输技术的研究现状与应用 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(10) : 2584-2600.
Fan Xingming, Mo Xiaoyong, Zhang Xin. Research status and application of wireless power transmission technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(10) : 2584-2600(in Chinese).
- [2] 戴欣, 唐春森, 王智慧等. 用于无线电能传输系统的磁场跟踪伺服机构 :CN102005829A. 2011
- [3] Bang-Jun Che, Fan-Yi Meng, Yue-Long Lyu, etc. Omnidirectional wireless power transfer system supporting mobile devices. Applied physics A, 2016, 122(54):1-5.
- [4] Donggeon Kim, Chulhun Seo. Omnidirectional Resonator in X-Y Plane Using a Crisscross Structure for Wireless Power Transfer. JOURNAL OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE, 2015, 3(15) : 194-198.
- [5] Lixin Shi, Zachary Kabelac, Dina Katabi, David Perreault. Wireless Power Hotspot that Charges All of Your Devices. 2015 Annual International Conference on Mobile Computing (Mobicom '15), 2015.
- [6] Ng, W.M., Zhang, C., Lin, D. et al. Two- and Three-Dimensional Omnidirectional Wireless Power Transfer[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9) :4470-4474.
- [7] Deyan Lin, Cheng Zhang, S. Y. Ron Hui. Mathematical Analysis of Omnidirectional Wireless Power Transfer—Part-I: Two-Dimensional Systems. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2017, 32(1):625-633.
- [8] Deyan Lin, Cheng Zhang, S. Y. Ron Hui. Mathematic Analysis of Omnidirectional Wireless Power Transfer—Part-II Three-Dimensional Systems. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2017, 32(1):613-624.
- [9] Deyan Lin, Cheng Zhang, S. Y. Ron Hui. Basic Control Principles of Omnidirectional Wireless Power Transfer. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2016, 31(7):5215-5227.
- [10] Jian Yin, Deyan Lin, S. Y. (Ron) Hui. Front-End Monitoring of the Mutual Inductance and Load Resistance in a Series-Series Compensated Wireless Power Transfer System. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, 2016, 10(31):7339-7352.

上接154页

三相电机缺相保护是三相电机应用过程中不可缺少的一环, 利用互感器的饱和原理结合相应的电路对三相电机的缺相进行保护既简单又实用, 完美解决了三相电机断相问题。该电流互感器虽然在设计上会比普通的互感器要复杂, 但应用电路简单, 所以整体使用的元件数量少, 造价成本低, 经济实用, 安装方便, 运行可靠。该互感器在实际运行时, 互感器对电动机绕组的断路缺相反应时间迅速, 从而使继电器可靠动作, 具有较好的保护效果, 可以广泛应用在三相电机缺相保护系统中。

参考文献

- [1] 全国互感器标准化技术委员会. GB1208-2006 电互感器 [S].

北京: 中国标准出版社, 2007.

- [2] 全国电工仪器仪表标准化技术委员会. JB/T1208-2006 微型电流互感器 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [3] 西安全路通号器材研究有限公司. TB/T3327-2015 铁路信号用断相保护器 [S]. 北京: 中国铁道出版社, 2015.

作者简介

孙海侠, 女, 北京创四方电子股份有限公司研发中心副总监;

史银虎, 男, 北京创四方电子股份有限公司总工程师。