

感应式非接触充电系统线圈参数优化与设计

感应式非接触输电因工作频率相对较低、传递功率大以及技术相对成熟而得到广泛关注,但充电距离短、对错位较敏感限制了其应用。在分析充电效率模型的基础上,通过优化线圈结构、匝数、匝间距、绕线方式和导线直径等设计提高系统传输效率,同时依据实际参数计算设计了一台6.5 kW的试验装置,实际充电效率达到80%以上,表明线圈优化合理。

刘秀兰 曾 爽 迟忠君 李香龙 金 渊/国网北京市电力公司电力科学研究院



刘秀兰/工程师

传统用电设备的电能都是以直接的电气连接实现能量传输,这种直接的电气连接方式存在电线裸露、漏电等安全隐患,使得这种供电方式难以适应多变的环境,例如湿度、温度等因素的剧烈变化。而随着电动汽车的迅速发展,应用无线电能传输技术实现非接触式充电,将解决传统导线式所面临的上述诸多问题^[1-4]。利用空间磁耦合技术实现能量隔空传输,不仅安全可靠,同时可减少充电站成本,利于技术应用与推广。

感应式非接触充电技术因其发展早、技术较成熟而得到广泛关注,同时其工作频率相对较低,传递功率很大,可以满足电动汽车充电的功率需求。但国内对此研究起步较晚,研究内容和方式仅停留在理论论证和试验验证

阶段,较国外有很大差距^[5-7]。首先推导了非接触充电系统传输效率表达式,得出系统效率仅与电源内阻、负载及线圈互感有关。然后从线圈自身参数(形状、结构、匝数、匝间距、绕线方式和材料选择)角度出发,优化线圈参数设计,提高系统传输效率。最后设计了一台6.5 kW电动汽车非接触充电试验装置,实际充电效率达80%以上。

感应式非接触充电系统

图1为感应式非接触充电系统简化框图。感应式非接触充电基于开关电源技术,将传统开关电源的变压器部分设计为相互分离的两个线圈,利用线圈之间的耦合系数,两个线圈形成分离式变压器,实现在电源和负载单元之间进行能量传递。

电动汽车非接触充电等效模型如图2所示。等效电路中供电部分为高频交流电源,两个充电线圈等效成两个带有互感的互感线圈,分别为 L_1 和 L_2 ,其互感值为 M ,线圈内阻阻值等效为两个电阻 R_1 、 R_2 ^[8]。引入两个电容 C_1 和 C_2 对电路进行双边串联补偿,进一步提高效率。用一个纯阻性负载 R_L 对电动汽车的电池进行粗略的等效。

关键词/Keywords

非接触电能传输 ·
电磁感应 ·
充电效率 ·
线圈参数 ·

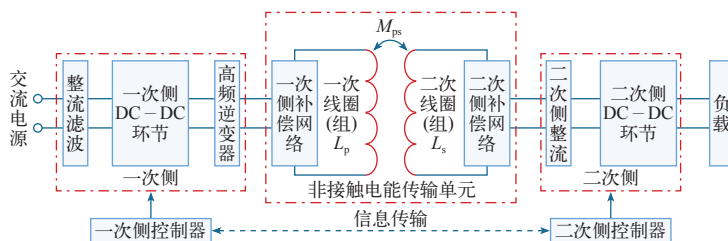


图1 感应式非接触充电系统简化框图

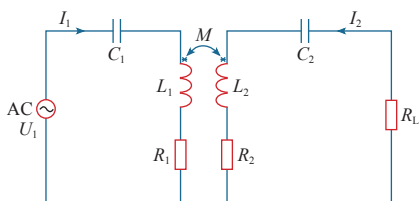


图2 非接触充电电路等效模型

对等效电路进行数学分析，谐振时有

$$j\omega L_1 + 1/j\omega C_1 = 0 \quad (1)$$

$$j\omega L_2 + 1/j\omega C_2 = 0 \quad (2)$$

谐振的情况下，整个系统的传输效率为

$$\eta = \frac{\omega^2 M^2 R_L}{R_1 (R_2 + R_L)^2 + \omega^2 M^2 (R_2 + R_L)} \quad (3)$$

由式(5)可知，非接触充电系统的效率与交流电源的频率 f 、一次线圈和二次线圈之间的互感 M 成正相关性。另外与负载的阻值大小有一定的关系。对负载的阻值 R_L 求式(3)的偏导数，当 $d\eta/dR_L = 0$ 时，可得到负载与效率的最佳匹配关系，即

$$R_L = \sqrt{R_2^2 + \omega^2 M^2 R_2 / R_1} \quad (4)$$

可以看出，系统最佳效率的实现与系统的工作频率、线圈的互感值和负载电阻的阻值有关。

在分析非接触输电传输效率的基础上，设计一台基于电磁感应式电动汽车非接触充电装置，具体参数指标要求如表1所示。

表1 电能发射与接收装置参数指标

参数	数值
功率/kW	6.5
效率(%)	75
工作频率/kHz	20~150
初级线圈输入电压/V	450
初级线圈输入电流/A	18
次级线圈输出电压/V	400
次级线圈输出电流/A	16.1

系统发射与接收线圈设计

系统发射线圈和接收线圈的设计关系到整个系统的工作效率，感应式非接触充电系统中工作频率较高，需要考虑高频交流电流可否良好地传导、高频状态下会形成较大的感抗等因素。针对感应式非接触充电系统的高频状态，考虑趋肤效应、电气参数和磁场形状等因素，优化电能发

射与接收线圈设计，包括线圈的形状、结构、匝数、匝间距、绕制方法和材料选择以提高系统工作效率。

1. 趋肤效应对感应式非接触充电影响

高频输电的工程中，必须考虑到趋肤效应，趋肤效应使得电子集中在导体的近外肤位置上流通，使横切面的核心部位呈现空泛状态，进而使电流输送量减少，其大小由趋肤深度表示，即

$$\Delta = \sqrt{2 / \omega \mu_{\text{铜}} \sigma} \quad (5)$$

式中， $\mu_{\text{铜}}$ 为铜线的磁导率， $\mu_{\text{铜}} = 1.2567 \times 10^{-6} \text{ H/m}$ ； $\sigma_{\text{铜}}$ 为铜线的电导率， $\sigma_{\text{铜}} = 59.6 \times 10^6 \text{ S/m}$ 。不同频率下，趋肤深度的大小如表2所示。

表2 不同频率下的趋肤深度

频率/kHz	趋肤深度/mm
10	0.65
20	0.46
30	0.38
40	0.32
50	0.29
70	0.25
100	0.21
150	0.15

试验装置中高频逆变电路输出电流的工作频率范围为20~150 kHz，故选用直径仅有 $\phi = 0.1 \text{ mm}$ 的利兹线（多股漆包铜线），这样能够很好地避免趋肤效应的发生，同时 $\phi = 0.1 \text{ mm}$ 的直径可以使得利兹线具有很高的柔软度，在对电能发射与接收装置进行线圈缠绕加工时更加容易。

2. 感应式非接触充电系统线圈尺寸的设计

试验装置所采用的线圈结构如图3所示，即为盘式结构。该结构可以使两个线圈之间的磁场达到最大程度的耦合。其中， D_0 为盘式线圈外径； D_1 为盘式线圈内径； w 为所用利兹线的线径； s 为

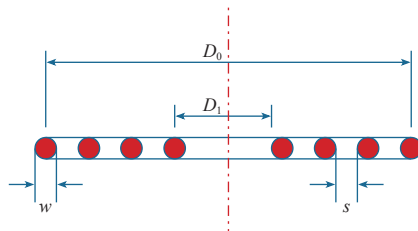


图3 盘式线圈示意图

利兹线之间的距离。

设定工作频率为技术指标内最低频率,即为 20 kHz,同时设定内阻为最大值 $R_1=R_2=0.5\ \Omega$,依据式(5)建立以互感值 M 为 x 轴、线圈后端等效电阻 R 为 y 轴和效率值 η 为 z 轴的3维坐标图,如图4所示。

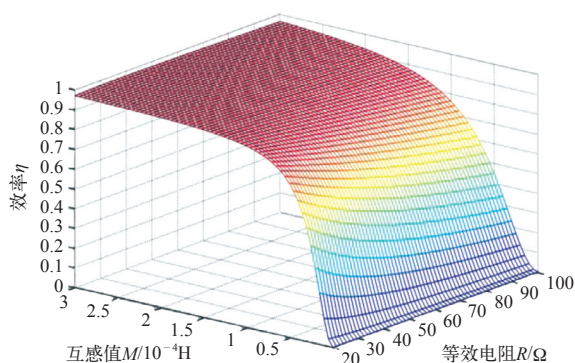


图4 互感及负载对效率的影响

由图4可知,为保证整个系统的工作效率在90%以上,两个线圈的互感值应至少在150 μH 以上。线圈的互感值可为

$$M = \mu_0 n_1 n_2 \sqrt{R_1 R_2} f(k) \quad (6)$$

式中, M 为线圈间的互感值; μ_0 为真空磁导率, $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}\ \text{H/m}$; n_1 、 n_2 分别为初级线圈和次级线圈的匝数; R_1 、 R_2 分别为初级线圈和次级线圈的半径。

$$f(k) = \left(\frac{2}{k} - k\right)K - \frac{2}{k}E \quad (7)$$

其中

$$k = \sqrt{\frac{4R_1 R_2}{x^2 + (R_1 + R_2)^2}} \quad (8)$$

$$K = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{1}{\sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha}} d\alpha \quad (9)$$

$$E = \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \alpha} d\alpha \quad (10)$$

式中, x 为初级线圈和次级线圈之间的距离; K 、 E 分别为第一类和第二类椭圆积分。

两个单匝线圈相距10 cm、半径尺寸相同条件下,互感值 M 的大小如表3所示。

为简化计算可将盘型线圈的互感视为线性叠加的,则

表3 单匝线圈互感值计算

k	K	E	M/H
0.894 4	2.257 2	1.178 5	9421E-08
0.948 7	2.578 1	1.104 8	1.24424E-07
0.970 1	2.830 4	1.068 9	2.22629E-07
0.980 6	3.034 6	1.049	3.37419E-07
0.986 4	3.210 9	1.036 4	4.68121E-07
0.989 9	3.351 7	1.028 7	6.05001E-07
0.992 3	3.482 6	1.023	7.5478E-07
0.993 9	3.597 4	1.018 9	9.1224E-07
0.995	3.695 6	1.016	1.0738E-06

$$M = M_{\text{mid}} N_1 N_2 \quad (11)$$

式中, M_{mid} 为盘式线圈中间位置单匝线圈间的互感值; N_1 、 N_2 为两侧线圈匝数。

为了满足至少150 μH 的互感值且兼顾盘式线圈尺寸条件,线圈的圈数应在25圈以上。

为了保证电流能够良好传输,平均电流密度 J 应取一个较小的值,6.5 kW的充电功率下,初级线圈和次级线圈的电流不会超过20 A,取 $J < 3\ \text{A/mm}^2$,线圈的横截面积应在7 mm^2 以上,实际设计中留有较大裕量,采用有效横截面积为9.8 mm^2 的利兹铜线,线径为5.5 mm。为保证散热良好要留有一定的空隙,设定空隙 $s = 4\ \text{mm}$ 。为获得更大的互感同时减小线圈盘的直径,采用双层盘式线圈的缠绕方式,每层匝数为13匝,共计26匝,符合线圈数设计要求。设计盘式线圈外径 D_0 为0.8 m,其内径 D_1 为0.6 m。此时电感的推测值为295.5 μH ,满足至少为150 μH 的要求。此时,导线长度为56.5 m,其电阻值 $R_1 = R_2 = 0.1\ \Omega$,小于0.5 Ω ,满足设计需求。

线圈的自感值可以根据特斯拉线圈的算法进行估计,由式(12)、式(13)近似计算线圈的自感,即

$$L = \frac{N^2 A^2}{30A - 11D_1} \quad (12)$$

$$A = \frac{D_1 + N(w + s)}{2} \quad (13)$$

根据上述对各数据的估算,现总结如下。传递线圈的自感 $L_1 = L_2 = 723\ \mu\text{H}$,单个线圈需要的导线长度为56.5 m,电阻值 $R_1 = R_2 = 0.1\ \Omega$ 。表4为装

置线圈设计方案参数。

表4 装置线圈设计方案参数

设计参数	数值
工作频率/kHz	20~150
趋肤深度/mm	<0.15
初级线圈输入电压/V	450
初级线圈输入电流/A	18
次级线圈输出电压/V	400
次级线圈输出电流/A	16.1
线圈导线横截面积/mm ²	10
传递线圈导线线径w/mm	3.6
盘型线圈圈数N	13×双层
盘式线圈外径D ₀ /m	0.8
盘式线圈内径D _i /m	约0.6
线圈导线间隔距离s/mm	4
线圈的自感值L ₁ 、L ₂ /μH	1 000
线圈互感值M/μH	150~250
线圈的电阻R ₁ 、R ₂ /Ω	0.1

谐振频率 $f=50\text{ kHz}$ 时, 谐振电容为

$$C=1/\omega^2L=1/[(2\pi f)^2L]=20\text{ nF} \tag{14}$$

当 $M=300\text{ }\mu\text{H}$, $R_1=R_2=0.1\text{ }\Omega$ 时, 系统的传递效率随等效电阻 R 和交流电压的频率 f 的变化关系如图5所示。

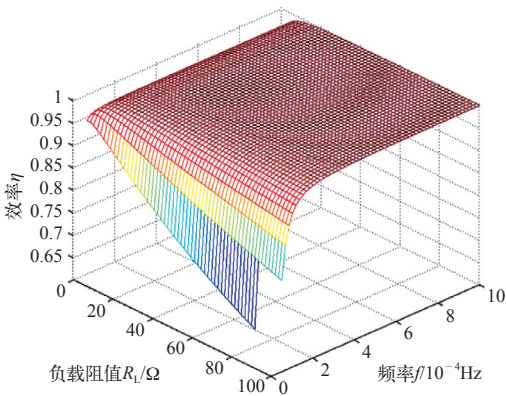


图5 频率和负载对效率的影响

由图5可知, 工作频率越高, 所得到的效率越大。

试验结果

试验中采用磷酸铁锂动力电池组内含3.2 V/80 A·h磷酸铁锂电池120只。每5 min中记录一次充电工作状态, 进行2 h的恒流充电。

图6为感应式非接触充电系统动力电池充电电流波形。电流围绕所设定的20 A的充电电流有小幅度的波动, 其波动范围没有超过0.5 A的纹波值, 充电电流稳定在20 A附近, 且纹波较小。试验证明, 感应式非接触充电系统能够有效地进行恒流充电。

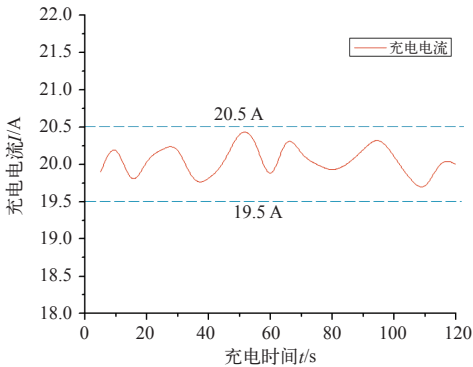


图6 动力电池充电电流波形

图7为感应式非接触充电系统动力电池充电电压波形。充电过程中, 随着电池电量的提升, 电压值从390 V缓慢上升至425 V, 符合动力电池充电时的特性。

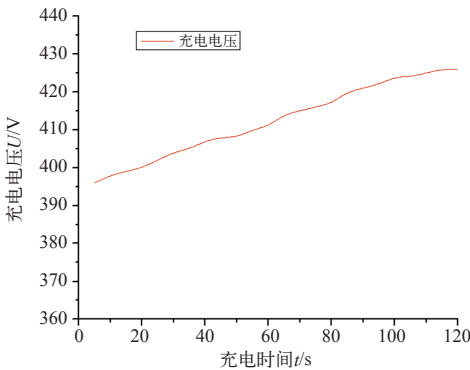


图7 动力电池充电电压波形

图8为动力电池充电过程中系统效率变化状况, 通过虚线更加直观地指示充电效率的变化情况。可以看出, 充电效率可以维持在80%以上, 最大充电效率可达85%。

结束语

分析了感应式非接触输电的数学模型, 得出感应式非接触充电的效率与系统工作频率、线圈间互感值以及后端等效负载值的关系。针对充

(下转第77页)

化,同时加强与供电部门的联络,避开所在电网的用电高峰,起到了一定的错峰填谷的作用;空间上,制定负荷调度原则,合理利用6台主变压器的容量,并将不同性质的负载分别供电,以保证对常规负载的可靠运行。

针对运行中可能出现的问题作简要探讨,对存在大容量冲击性试验负荷的变电站的设计建设和运行调度提出了工程参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 屠三益,唐德光,沈世媛,等.上海市35 kV、110 kV、220 kV变电站最佳容量探讨(一)[J].上海电力,1996,9(1):19-22.

- [2] 李季春.寺河110 kV变电站一次系统设计综述[J].煤炭工程,2004(3):7-10.
- [3] 国家电网公司办公厅.Q/GDW 203—2008 110 kV变电站通用设计规范[S].
- [4] 糜作维.地区电网110 kV母线运行方式安排分析[J].电力学报,2009,24(6):518-520.
- [5] 杨珉.110 kV变电站运行接线形式及调度运行的探讨[J].通信世界,2014,7(13):42-43.
- [6] 赵雪菲.110 kV变电站设计[D].北京:华北电力大学,2012.
- [7] 张小兵.110 kV变电站建设的注意事项[J].科技传播,2013(23):42-47.

(收稿日期:2015-04-28) EA

(上接第71页)

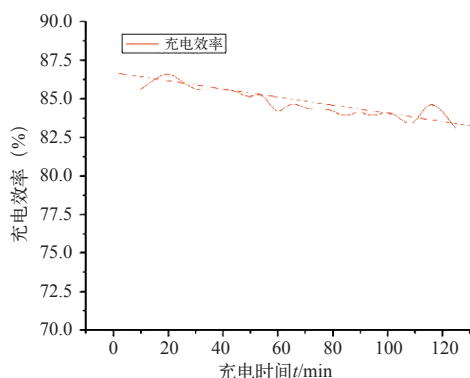


图8 动力电池充电效率变化波形

电效率低的问题从线圈形状、结构、匝数、匝间距、绕制方法和材料选择等方面进行研究和计算,以提高线圈间互感、线圈耦合度。设计了一台功率为6.5 kW的电动汽车无线充电的试验装置,采用磷酸铁锂动力电池组进行充电试验,实际充电效率维持在80%以上,满足装置设计要求。

参考文献

- [1] Nikola T. The transmission of electrical energy without wires[J]. Electrical World and Engineer, 1904(5):566-572.

- [2] Nikola T. World system of wireless transmission of energy[J]. Telegraph and Telegraph Age, 1927, 10(16):1510-1515.
- [3] Brown W C. Thermionic diode rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968(1):295-298.
- [4] Brown W C. The combination receiving antenna and rectifier[J]. Microwave Power Engineering, 1968(2):273-275.
- [5] André Kurs, Aristeidis Karalis, Robert Moffatt, et al. Wireless power transfer via strongly coupled magnetic resonances[J]. Science, 2007(83):317.
- [6] 黄学良,谭林林,陈中,等.无线电能传输技术研究与应用综述[J].电工技术学报,2013,28(10):1-11.
- [7] Huh J, Lee S W, Lee W Y, et al. Narrow-width inductive power transfer system for online electrical vehicles[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(12):3666-3679.
- [8] 赵争鸣,张艺明,陈凯楠,等.磁耦合谐振式无线电能传输技术新进展[J].中国电机工程学报,2013,33(3):1-13.

(收稿日期:2015-06-15) EA