

无接触供电系统PS补偿结构下效率研究

无接触供电系统采用松耦合感应能量传输, 和传统变压器相比, 其耦合系数低, 因此传输效率较低, 这正是制约其发展的地方。从无接触变压器的一次、二次侧的逆变电路, 一次、二次侧的无功补偿方式等方面分析了影响系统效率的主要因素, 为PS补偿结构下系统效率的提高提供了参考。

周阳 周福林 高洁/西南交通大学电气工程学院

0 引言

经过多年来国内外科研工作者对无接触电能传输领域给予的持续关注与开展的大量研究, 无接触电能传输技术在原理和技术上已经取得很多成果。无接触电能传输系统采用电磁感应耦合的方式进行电能传输, 克服了传统的导体接触传输方式带来的磨损、电击、火花和噪音等一系列缺点和不足^[1]。而无接触电能传输系统不同于传统的变压器传输电能, 其所依靠的是疏松耦合的磁路系统, 耦合率较低, 需要通过对其设计补偿电路来提高系统的效率^[2]。所以需要我们要研究不同补偿拓扑结构对系统效率的

影响, 进一步对系统效率进行优化。本文重点对PS补偿结构下的效率提升进行研究。

1 无接触供电系统原理

无接触供电系统由电源逆变电路、无接触变压器、负载整流电路和控制保护电路等组成, 系统原理如图1所示。其中电源侧可以是交流电源也可以是直流电源, 不同之处在于交流电源经过交直交逆变出所需高频交流电^[2]。高频交流电能通过无接触拾电器将能量从初级传输到次级, 直流供电时无需接整流电路, 直接逆变为高频交流电。

由于和传统的直接接触不同, 无接触供电系统, 通过空气隙进行能量传递, 磁耦合率较低。所以需要对其进行相应的补偿, 提高系统整体效率。

2 补偿系统简介

在系统工作频率固定的基础上, 对于典型的感应耦合电能传输技术, 在初级线圈端和次级线圈端加入补偿电容, 组成相应的补偿电路, 对漏感进行补偿, 以提高无接触电能传输系统的功率传递能力, 从而提高系统系统的效率。

常见的补偿电路拓扑如图2所示^[3]。



周阳/博士研究生

关键词/Keywords

无接触供电系统 ·
系统效率 ·
PS补偿结构 ·

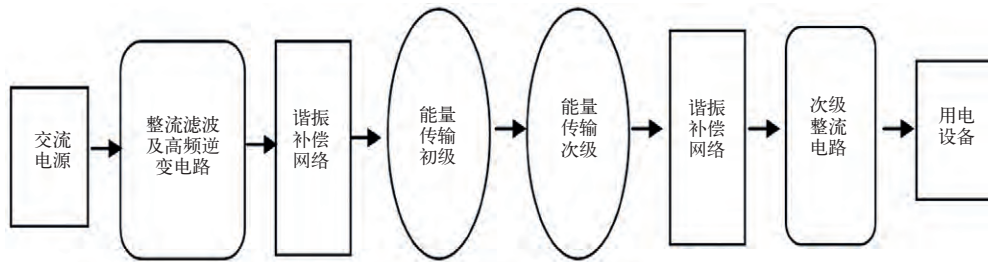


图1 无接触供电系统结构图

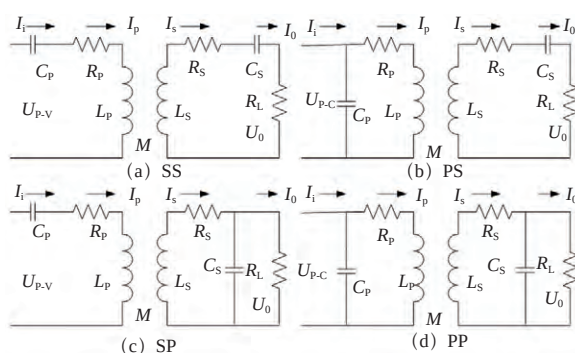


图2 4种基本补偿方式

图中 U_p 和 U_0 分别为初级输入电压，次级输出电压 C_p 、 C_s 分别为初级次级补偿电容， L_p 、 L_s 分别为初级次级电感， R_L 、 R_p 、 R_s 分别为负载电阻，初级电路和次级电阻， M 为互感。

多谐振补偿拓扑在ICPT系统中的作用要大于单谐振补偿拓扑的作用，具体体现在功率传输能力及能量传输效率的提高方面。多谐振补偿有4种基本拓扑形式分是SS，SP，PS，PP4种拓扑结构（S和P分别为串联补偿和并联补偿），初级侧电路采用串联补偿的系统称为电压型ICPT系统（即SS型和SP型），初级侧电路采用并联补偿的系统则称为电流型ICPT系统（即PS型和PP型）。当系统工作在谐振频率下时，系统输出功率最大。通过谐振补偿技术可以有效地提升系统的传输效率，本文重点对PS补偿结构下的效率提升进行研究。

3 PS结构下系统电能传输特性与效率分析

PS拓扑补偿结构的ICPT系统的反映阻抗是为电阻性的，即反映电抗为0，此时反映电阻的大小随谐振频率和耦合系数的增大而增大，而随负载电阻的增大而减小。而在进行效率分析的时候，由于系统工作在高频交变磁场的环境下，线圈内阻的损耗不能忽略，所以在考虑线圈内阻的情况下可得次级反射到初级的反射阻抗为^[4]

$$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{R_L + R_s} \quad (1)$$

式中， Z_r 为反应阻抗， ω 为角频率。

反映电阻随着谐振频率的增大而增大，随着负载电阻的增加而减少，并且由之前章节的分析可知反映电阻吸收的有功功率即为初级向次级传

输的有功功率，所以在初级供电电源为电流源的系统中，反映电阻越大，负载端获得的有功功率越高。即可知，此时PS型补偿结构下，随着系统负载的增加其所获得的有功功率反而在减少^[5]。

考虑到在进行功率及效率分析的过程中，初次级线圈内阻的损耗是不能忽略的，所以在初次级补偿电容的计算中我们不忽略 R_p 和 R_s ，可进行以下推算。

次级采用串联补偿，则次级侧阻抗为

$$Z_s = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_L + R_s \quad (2)$$

当感抗和容抗相抵消时有

$$j\omega L_s = \frac{1}{j\omega C_s} \quad (3)$$

可得

$$C_s = \frac{1}{\omega^2 L_s} \quad (4)$$

研究发现线圈内阻考虑的加入不影响次级补偿电容的大小。

初级等效输入导纳为

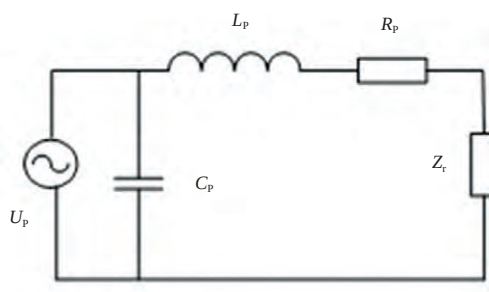
$$Y_p = j\omega C_p + \frac{1}{R_p + j\omega L_p + Z_r} \quad (5)$$

次级完全谐振补偿情况下，次级反射到初级的反映电阻，当初级处于完全谐振状态下时，初级回路导纳 Y_p 的虚部为0，即 $\text{Im}(Y_p)=0$ 时，可得

$$C_p = \frac{L_p}{\omega^2 L_p^2 + \left(R_p + \frac{\omega^2 M^2}{R_L + R_s}\right)^2} \quad (6)$$

此时，在谐振条件下可以传输最大功率^[6]。

进一步分析，PS结构等效电路模型如图3所示。



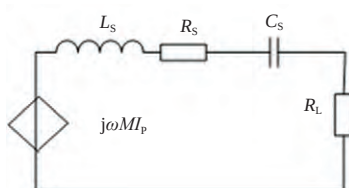


图3 PS拓扑结构互感电路等效模型

通过对等效模型的分析，在负载及电源电压大小不变，无接触变压器初次级没有发生相对位移情况下，初级电流随谐振频率的变化而变化的情况如图4所示。

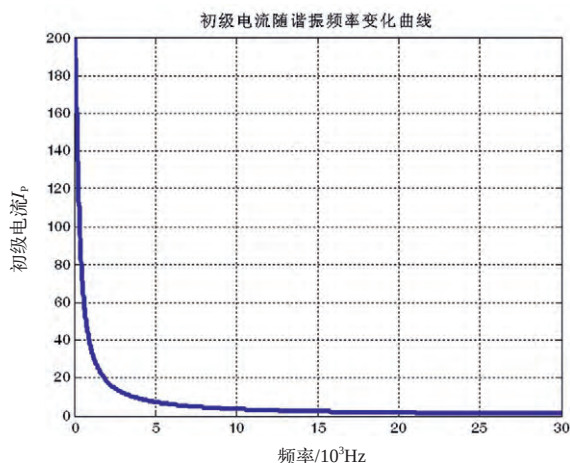


图4 初级电流随谐振频率变化的曲线图

由图4可以看出，此时，初级线圈电流会随着系统谐振频率的增大而减小。

相同条件下，系统的输出功率随谐振频率的变化而变化的曲线如图5所示。

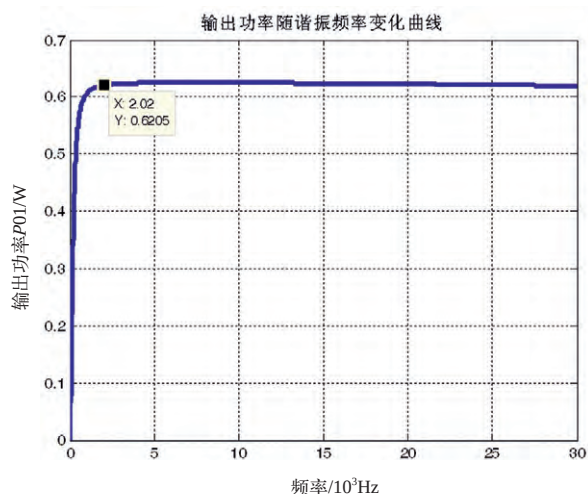


图5 输出功率随谐振频率变化曲线

系统效率对于不同的频率下，耦合系数的影响如图6所示。

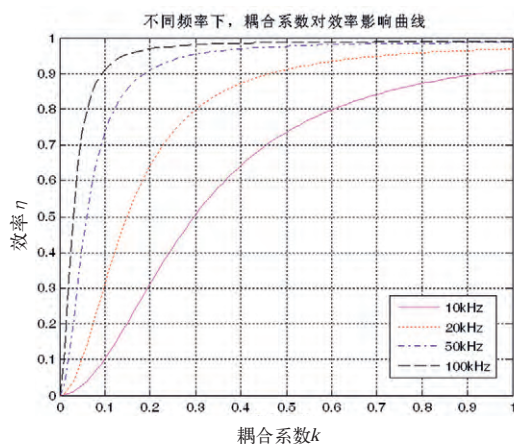


图6 耦合率对效率影响曲线

谐振频率分别为10 kHz、20 kHz、50 kHz、100 kHz时，系统效率随耦合系数的增大而变化的曲线，我们可以看到，不论在多大的谐振频率下，系统效率随耦合系数变化的总体趋势都是：随着k的增大，系统效率逐渐增大。对比不同谐振频率下的曲线我们会发现，谐振频率越大，系统越容易在耦合系数较小的情况下达到较高的传输效率，所以对于ICPT系统这种耦合系数较低的松耦合电能传输系统，在PS型补偿结构下，提高系统的谐振运行频率能更有效的提高系统的电能传输效率。

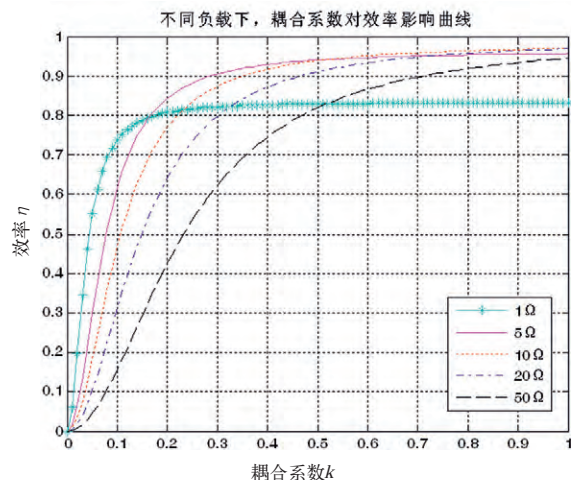


图7 负载对效率影响曲线

负载大小如图所示时，系统传输效率随耦合系数的变化而变化的关系曲线图，由图可得，系统效率随耦合系数变化的总体趋势也都是：随着k的增大，系统效率逐渐增大。而在系统负载很小(1 \Omega)时，在耦合系数达到0.3之后继续增大耦合系数对系统传输效率的提高已经基本没有作

用。随着系统负载的增大,发现耦合系数的改善能使系统的传输效率达到更高的值,但是在负载达到一定的大小之后,随着负载的增大,通过改善耦合系数所能达到的最大系统传输效率反而减小。在PS型补偿结构下,系统更适合给一定范围内的小负载供电,因为此时系统更容易达到较高的传输效率。

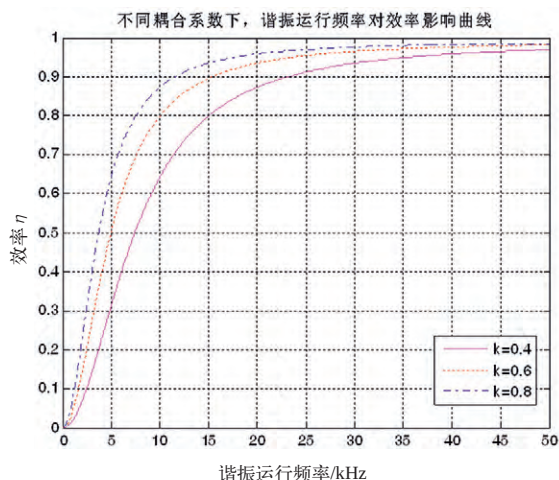


图8 谐振运行频率对效率影响曲线

图8表示出了耦合系数分别为0.4、0.6、0.8时,系统电能传输效率随谐振运行频率的变化而变化的关系曲线。由图可得,总的趋势是:系统电能传输效率随着谐振运行频率的增大而增大,最后都能趋近一个较大的值。谐振频率较低时,增大系统谐振运行频率对系统效率的改善比较明显,在达到一定的谐振运行频率之后,系统效率已经提高到一个较优的值,这时继续增大谐振运行频率系统效率依然会增大,但是对系统效率的改善已经不显著。由此图还可以看出,系统耦合系数越大系统越容易在相对较低的谐振运行频率下达到较高的电能传输效率。

综合前面的分析,在忽略损耗的条件下,对谐振运行频率20 kHz的系统分别在耦合系数为0.4、0.6、0.8的情况下的效率最优负载进行选取。系统的其他参数如表1所示。

表 1

参数	取值	参数	取值
$L_p/\mu F$	86	R_p/Ω	0.1
$L_s/\mu F$	68.7	R_s/Ω	0.2

在此条件下,不同耦合系数下效率最优负载电阻如表2所示。

表2 不同耦合系数下效率最优负载电阻

系统状态	最优效率	效率最优负载电阻
$f=20\text{ kHz}, k=0.4$	92.94%	5.46 Ω
$f=20\text{ kHz}, k=0.6$	95.24%	8.19 Ω
$f=20\text{ kHz}, k=0.8$	96.41%	10.92 Ω

再计算出不同耦合系数下高效运行负载电阻范围,如表3所示。

表3 不同耦合系数下高效运行负载电阻范围

系统状态	高效运行状态	负载电阻范围
$f=20\text{ kHz}, k=0.4$	$\eta>90\%$	2.13~14.07 Ω
$f=20\text{ kHz}, k=0.6$	$\eta>90\%$	1.92~35.02 Ω
$f=20\text{ kHz}, k=0.8$	$\eta>90\%$	1.87~64.11 Ω

在进行效率优化的时候,考虑到实际情况,这里选取耦合率 $k=0.4$ 时。作出耦合系数为0.4,电流源供电电流15A时,效率曲线与输出功率曲线的对比,如图9所示:

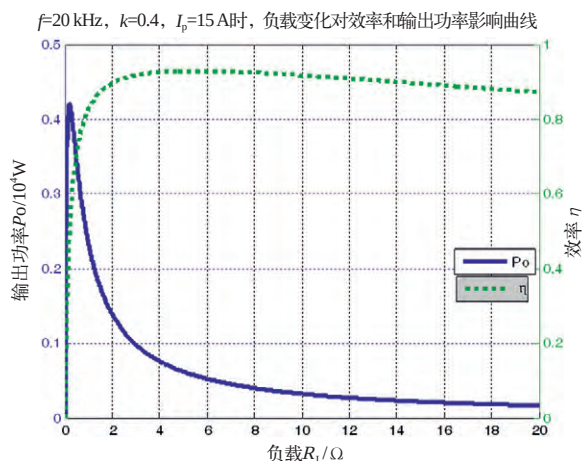


图9 负载电阻变化对效率和输出功率影响曲线

从图可以发现,效率的优化与输出功率的优化是比较矛盾的,进一步通过系统输出功率公式

$$P_0 = \frac{(\omega M I_p)^2 R_L}{(R_L + R_s)^2}$$

可以看出,最大输出功率的取得是在 $R_L=R_s$ 时得到的,此时的效率只有50%,即可得最大输出功率的取得与ICPT系统的固有结构有关,由于次

级线圈内阻 R_s 很小,则运行负载必须很小时才能达到输出功率的最大化,而且这个值不会随系统运行状态的改变而改变^[7]。所以在满足效率优化和系统适用范围较宽的前提下,以供电电源为电流源为例,可以通过提高初级输入电流的有效值来使输出功率达到具体应用场合的要求,对于PS拓扑结构的ICPT系统即可以通过提高输入电流的有效值来提高输出电压的有效值,以此来实现输出功率的提高。

但是,一般来说,在实际系统的应用中电源的选择是相对固定的,而且电源供电性能也是有限的,所以总的来说PS型拓扑补偿结构适合应用于小功率的ICPT系统。

下面给出根据表3得出的,在系统谐振运行频率为20 kHz,供电电流为15 A的情况下,通过仿真分析不同耦合系数系统高效运行状态下的输出有功功率范围。见表4。

表4 不同耦合系数下高效运行输出功率范围

系统状态	高效运行状态 (%)	负载电阻范围/W
$f=20\text{ kHz}, k=0.4$	$\eta>90$	232~1 318
$f=20\text{ kHz}, k=0.6$	$\eta>90$	213~3 228
$f=20\text{ kHz}, k=0.8$	$\eta>90$	208~5 863

由上表可以看出,系统耦合系数越大,就能在保持高效运行的状态下,拥有越宽的输出功率范围。也可以印证PS型拓扑补偿结构适合应用于小功率的ICPT系统的结论。

4 结束语

设计无接触供电系统的目的就是在保障系统稳定性和减小系统体积的基础上尽可能地提高系统的传输效率。本文通过补偿系统对系统效率进行分析,研究了PS结构下不同耦合情况,不同负载,不同频率等系统效率特性,对于实际应用中对该结构下系统的研究和设计具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] Zierhofer CM. A class-E tuned power oscillator for inductive transmission of digital data

and power[C]. 6th Mediterranean Proceedings Electrotechnical Conference, 1991, 1: 789-792.

- [2] Yungtaek Jang, Milan M Jovanovic. A new soft-switched contactless battery charger with robust local controllers[C]. The 25th International Telecommunication Energy Conference, 2003, 2: 473-479.

- [3] T. Bieler, M. Perrottet, V. Nguyen, and Y. Perriard, "Contactless power and information transmission," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, vol. 1, 2001, pp. 83-88.

- [4] Y. Jang and M. M. Jovanovic, "A contactless electrical energy transmission system for portable-telephone battery chargers," in Conf. Rec. Telecommunications Energy Conf., 2000, pp. 726-732.

- [5] G. B. Joun and B. H. Cho, "An energy transmission system for an artificial heart using leakage inductance compensation of ranscutaneous transformer," IEEE

- [6] Xun Liu, W.M. Ng, C.K. Lee, S.Y. (Ron) Hui. Optimal Operation of Contactless Transformers with Resonance in Secondary Circuits[J]. IEEE, 2008: 645-650

- [7] Chwei-Sen Wang, Grant A. Covic, Oskar H. Stielau. Power Transfer Capability and Bifurcation[J]. IEEE Transactions On Industrial Electronics, 2004, 278(46): 148-157

(收稿日期: 2015-05-15) EA

作者简介

周阳(1987-),男,博士研究生,主要研究方向为电能质量分析,供变电技术。

周福林(1982-),男,博士,讲师,主要研究方向为牵引供电系统分析、车网电气匹配等。