

互感偏移对 SP、S/SP、LCL/S、LCC/S 拓扑电压增益和效率的影响分析

张劲霄, 王义, 耿宇宇, 杨中平, 林飞

(北京交通大学电气工程学院, 北京市 100044)

Analysis of Mutual Inductance Offset on Voltage Gain and Efficiency of SP, S/SP, LCL/S and LCC/S Topologies

ZHANG Jinxiao, WANG Yi, GENG Yuyu, YANG Zhongping, LIN Fei

(College of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing, 100044)

摘要: 无线电能传输(Wireless Power Transmission, WPT)系统的原副边之间没有物理接触,其工作状态受耦合环节的影响较大。在实际应用中,很难做到原副边线圈没有偏移,线圈的偏移将造成互感偏移,系统也将处于不完全谐振状态,从而影响耦合环节电压增益和效率等。所以通过推导各拓扑不完全谐振下的电压增益、效率表达式,并分析不完全谐振条件下的系统传输特性是有必要的。在 WPT 系统的应用中,补偿电感电容的组合多种多样,但其中许多拓扑过于复杂,导致元件数增加,成本增加,且电路阶数增加,解析困难,因此本文筛选出 SP、S/SP、LCL/S、LCC/S 四种常用的恒压输出型补偿拓扑作为对比对象,针对互感偏移对电压增益和效率的影响进行分析。

关键词: 无线电能传输; 补偿拓扑; 互感偏移; 电压增益; 效率

1 引言

耦合系统谐振补偿电路是无线电能传输重要的一部分, 现在的研究多集中在补偿拓扑的结构, 以及其电路特性的研究。文献[1]分析了 S/S 补偿拓扑和 S/P 补偿拓扑的电压增益和输入阻抗特性。文献[2]提出了 S/SP 补偿拓扑结构, 这种补偿拓扑在等效负载变化时电压增益保持不变, 且输入相角为零, 保证了无功功率为零, 但是没有对电源应力和抗线圈偏移能力进行分析。文献[3]对 S/SP 拓扑的功率和效率表达式进行了推导, 并优化了互感参数, 使整体功率效率最优。文献[4]提出了 SP/S 补偿拓扑, 这种拓扑在一定耦合系数范围内, 在不增加电源伏安容量的基础上, 保证了额定功率传输, 但没有直观分析抗线圈偏移能力。文献[5]提出了 PS-SS 补偿拓扑结构, 通过切换补偿拓扑的方式, 可以保证输出电压恒定, 但是电路拓扑比较复杂。

文献[6]提出了 SP-SSP 混合补偿拓扑, 这种拓扑可以实现恒压或恒流输出, 但是 SP 输入相角不为零, 存在无功损耗。文献[7]给出了 LCC 型补偿拓扑的电路模型, 并分析了效率、功率与原副边间距、工作频率、等效负载间的关系。文献[8]提出了双边 LCC 型补偿拓扑, 具有恒压输出特性, 且输出特性良好, 抗干扰能力较好, 但是应用的元件较多。文献[9]提出了一种补偿拓扑的建模方法, 并应用其建模方法计算了在其设定的工况下, SS、SP、LCC 等拓扑的效率。文献[10]对双边 LCC 补偿拓扑进行了理论分析与实验验证, 其中包括线圈发生横向和纵向偏移后功率和效率随偏移距离的变化情况。文献[11]对比了 SS、LCC-LCC 和 CC-CC 补偿拓扑, 分析了互感大小对其系统效率的影响, 互感较大时 SS 效率相对更高更稳定, 反之 LCC-LCC 和 CC-CC 更高更稳定。

在工程应用中, 可能由于线圈间存在一定偏移, 导致互感发生偏移, 对 WPT 系统的电路特性产生影响。因此研究互感偏移对电路特性的影响尤为重要。本文推导了 SP、S/SP、LCL/S、LCC/S 四种恒压输出拓扑的增益及效率表达式, 绘制电压增益和效率随互感变化的曲线, 比较不同拓扑互感偏移后电路特性的变化情况, 为实际应用作一定参考。

2 谐振补偿电路模型

由于互感模型原理简单, 且可以更好的体现互感对电路特性的影响, 因此选择互感模型进行分析, 首先令

$$\begin{cases} Z_P = j\omega L_P + \frac{1}{j\omega C_P} + R_P \\ Z_S = j\omega L_S + \frac{1}{j\omega C_S} + R_S \\ Z_R = j\omega L_R + \frac{1}{j\omega C_R} + R_R \end{cases} \quad (1)$$

先分析 SP 拓扑的电压增益、效率。电路图如图 1 所示, 根据互感模型, 应用基尔霍夫定律列写电压电流关系方程如式(2)所示。其中 U_{in} 、 I_{in} 分别为谐振补偿电路输入电压电流, I_P 、 I_S 分别为流经原、副边线圈的电流, U_{out} 、 I_{out} 为输出电压、电流, L_P 、 L_S 为原、副边线圈自感, C_P 、 C_S 为原、副边补偿电容, R_P 、 R_S 为原、副边线圈内阻, R 为等效负载。

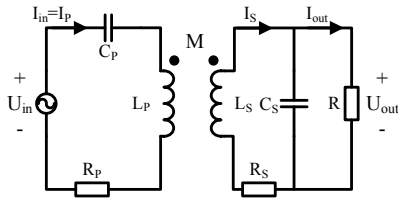


图 1 SP 谐振补偿拓扑电路

$$\begin{cases} U_{in} = I_P Z_P - I_S j\omega M \\ 0 = I_S Z_S - I_P j\omega M - I_{out} / (j\omega C_S) \\ 0 = I_{out} [1 / (j\omega C_S) + R] - I_S / (j\omega C_S) \\ U_{out} = I_{out} R \end{cases} \quad (2)$$

求得电压增益为:

$$G_V = \left| \frac{U_{out}}{U_{in}} \right| = \left| \frac{1}{\frac{[Z_S - 1/(j\omega C_S)]Z_P + \omega^2 M^2}{j\omega M R} + \frac{(Z_S + \omega^2 M^2)C_S}{M}} \right| \quad (3)$$

完全谐振条件为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L_P - \frac{M^2}{L_S})C_P}} = \frac{1}{\sqrt{L_S C_S}} \quad (4)$$

在完全谐振且不考虑电感电容内阻的情况下, 式(3)所示分母中的两项, 有等效负载 R 的一项应为 0, 此时电压增益的值如下,

$$G_V = \frac{L_S}{M} \quad (5)$$

SP 拓扑的效率如下所示,

$$\eta = \left| \frac{P_{out}}{P_{in}} \right| = \left| \frac{U_{out} I_{out}}{U_{in} I_{in}} \right| = \left| \frac{\omega^2 M^2 R}{(1 + j\omega C_S R)Z_S - \frac{1}{j\omega C_S}} \right| \cdot \left| \frac{1}{(1 + j\omega C_S R)(Z_P Z_S + \omega^2 M^2) - \frac{Z_P}{j\omega C_S}} \right| \quad (6)$$

S/SP 补偿拓扑如图 2 所示, C_3 为补偿电容。

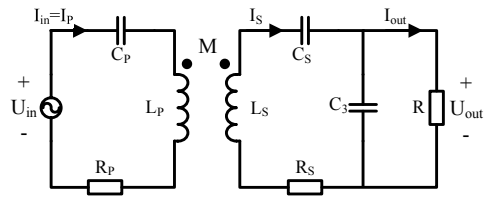


图 2 S/SP 谐振补偿拓扑电路

电压增益为:

$$G_V = \left| \frac{1}{\frac{Z_P Z_S + \omega^2 M^2}{j\omega M R} + \frac{(Z_P Z_S + \omega^2 M^2)j\omega C_3 + Z_P}{j\omega M}} \right| \quad (7)$$

完全谐振条件为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L_P - M)C_P}} = \frac{1}{\sqrt{(L_S - M)C_S}} = \frac{1}{\sqrt{M C_3}} \quad (8)$$

完全谐振且不考虑内阻的条件下,

$$G_V = 1 \quad (9)$$

S/SP 型拓扑的效率如下所示,

$$\eta = \left| \frac{\omega^2 M^2 R}{(1 + j\omega C_3 R)Z_S + R} \right| \cdot \left| \frac{1}{(1 + j\omega C_3 R)(Z_P Z_S + \omega^2 M^2) + Z_P R} \right| \quad (10)$$

LCL/S 补偿拓扑如图 3 所示, 其中 L_X 和 R_X 分别为补偿电感及其内阻。

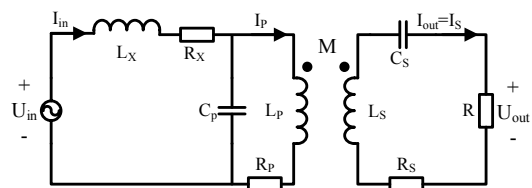


图 3 LCL/S 谐振补偿拓扑电路

电压增益为:

$$G_v = \left| \frac{1}{\frac{(Z_p Z_s + \omega^2 M^2) \omega^2 C_p^2 Z_p + Z_s}{\omega^2 M C_p R} + \frac{\omega^2 Z_p^2 C_p^2 + 1}{\omega^2 M C_p}} \right| \quad (11)$$

完全谐振条件为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_x C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_p C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (12)$$

完全谐振且不考虑内阻的条件下,

$$G_v = \frac{M}{L_p} \quad (13)$$

LCL/S 型拓扑的效率如下所示,

$$\eta = \left| \frac{\omega^2 M^2 \frac{R}{(Z_s + R)^2}}{\left[\frac{\omega^2 M^2}{Z_s + R} + Z_p \right] \left[\frac{\omega^4 M^2 C_p^2 Z_p}{Z_s + R} + \omega^2 Z_p^2 C_p^2 + 1 \right]} \right| \quad (14)$$

LCC/S 补偿拓扑如图 4 所示, 其中 L_R 和 R_R 分别为补偿电感及其内阻, C_R 为补偿电容。

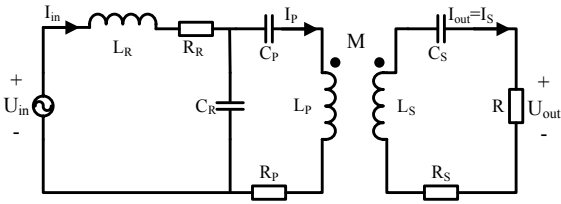


图 4 LCC/S 谐振补偿拓扑电路

电压增益为:

$$G_v = \left| \frac{1}{\frac{(Z_p Z_s + \omega^2 M^2 + \frac{Z_s}{j\omega C_R}) \omega^2 C_R^2 Z_R + Z_s}{\omega^2 M C_R R} + \frac{(Z_p + \frac{1}{j\omega C_R}) \omega^2 C_R^2 Z_R + 1}{\omega^2 M C_R}} \right| \quad (15)$$

完全谐振条件为:

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_R C_R}} = \frac{1}{\sqrt{(L_p - L_R) C_p}} = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (16)$$

完全谐振且不考虑内阻的条件下,

$$G_v = \frac{M}{L_R} \quad (17)$$

LCC/S 型拓扑的效率如下所示,

$$\eta = \left| \frac{\omega^2 M^2 \frac{R}{(Z_s + R)^2}}{\frac{\omega^2 M^2}{Z_s + R} + Z_p + \frac{1}{j\omega C_R}} \right| \cdot \left| \frac{1}{\frac{\omega^4 M^2 C_R^2 Z_R}{Z_s + R} + (Z_p + \frac{1}{j\omega C_R}) \omega^2 C_R^2 Z_R + 1} \right| \quad (18)$$

以上推导了 SP、S/SP、LCL/S、LCC/S 四种恒压输出型补偿拓扑的电压增益和效率表达式。可以发现互感、频率、等效负载会对电压增益、效率产生影响。本文主要针对互感偏移的影响进行对比分析。

3 电压增益、效率分析

以自动导向车辆 AGV 作为应用背景, 其功率一般较低, 本文选取参数为: 原、副边线圈自感 $L_p=100.23\mu\text{H}$, $L_s=99.15\mu\text{H}$, 互感 $M=12.1\mu\text{H}$, 系统的工作频率设定为 $f=85\text{kHz}$, LCC/S 拓扑中的补偿电感取 $L_R=12.44\mu\text{H}$, 等效负载选择 $R=125\Omega$, 频率 $f=85\text{kHz}$ 。根据谐振频率与补偿电容和电感的关系, 求出对应的补偿电容值如表 1 所示。

表 1 补偿电容参数

补偿拓扑	补偿电容参数		
	$C_p(\mu\text{F})$	$C_s(\mu\text{F})$	$C_s(\text{S/SP})$ 、 $C_R(\text{LCC/S})$ (μF)
SP	0.036	0.035	
S/SP	0.040	0.040	0.290
LCL/S	0.040	0.035	
LCC/S	0.035	0.035	0.282

3.1 电压增益特性分析

由于各拓扑的电压增益值大小不等, 无法在同电压等级下进行比较, 因此除了电压增益指标外还选择用电压增益变化率指标来衡量互感对电压增益的影响, 电压增益变化率 G_{vr} 可以表示为不同互感值下的电压增益除以不发生偏移时额定互感 M_r 下的电压增益值, 即

$$G_{vr}(M) = \frac{G_v(M)}{G_v(M_r)} \quad (15)$$

图 5、图 6 分别为四种拓扑电压增益和电压增益变化率随互感变化的情况, 各曲线均根据上一节中推导的表达式绘制。

由图 5 也可以发现各拓扑的电压增益大小是有差异的, 但其值是在完全谐振点的电压增益值附近。结合式(5)(9)(13)(17)与图 5, 在所选工况下 SP

拓扑的电压等级较大,电压增益较大,所以电压增益变化量也较大;而LCL/S电压增益较小,电压增益变化量也较小;S/SP电压增益在1左右;LCC/S理论上可以通过调节 L_R 改变电压增益大小,根据本次选择的参数,电压增益在1左右。

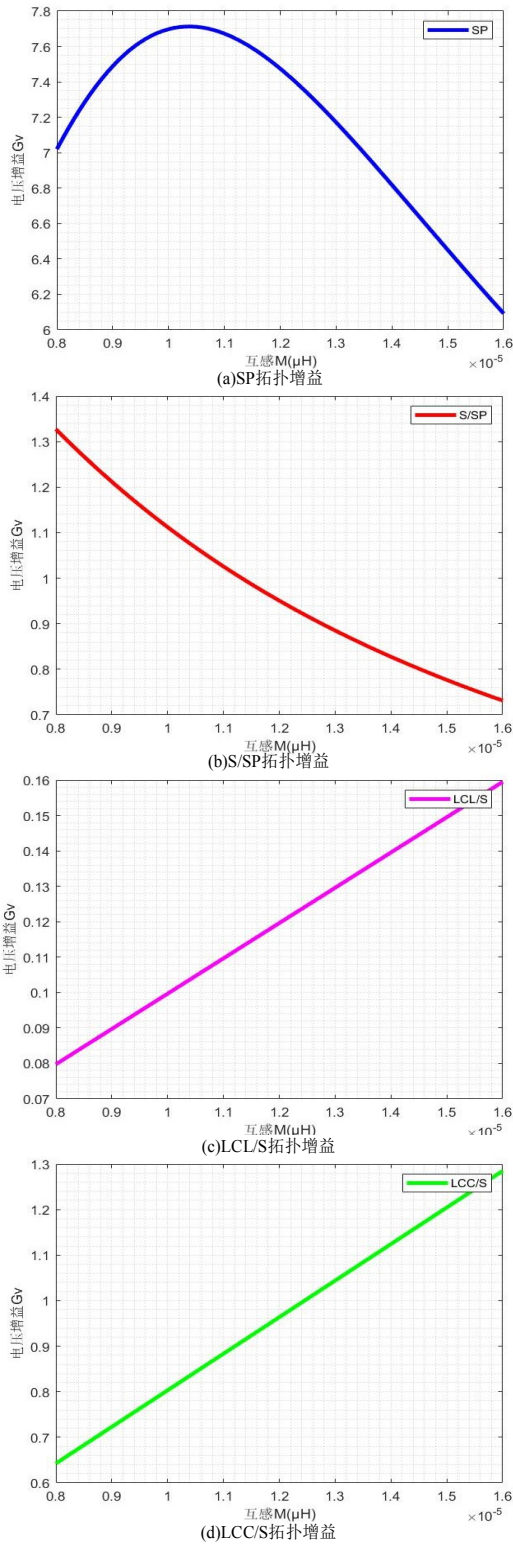


图5 四种拓扑电压增益随互感变化图

图6(a)所示为四种电压增益变化率随互感变化的曲线,在互感 $M=12.1\mu\text{H}$ 时,各拓扑电压增益变化率均为1,这样保证了不同拓扑在相同的电压等级下进行比较,其中LCL/S与LCC/S拓扑的电压增益变化率几乎重叠。从图中可以发现SP拓扑的电压增益变化率变化较小,即在相同输出电压等级的条件下,SP拓扑电压增益变化率受互感偏移的影响更小,其余三种电压增益变化率的变化率相对较大。

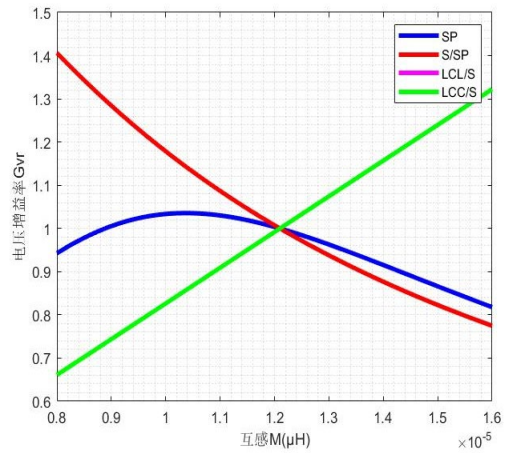


图6 四种拓扑电压增益率随互感变化图

3.2 效率特性分析

绘制如图7所示曲线分析互感变化对效率的影响。从图中可以看出几个拓扑的效率均随着互感的增大而增大,所以在设计应用时应尽可能提高互感值。在额定工况时互感值已确定的情况下,LCL/S、LCC/S和S/SP拓扑的效率随互感变化较平稳,而SP的效率虽然在互感高的时候比较高,但是互感跌落时效率的跌落也较明显。

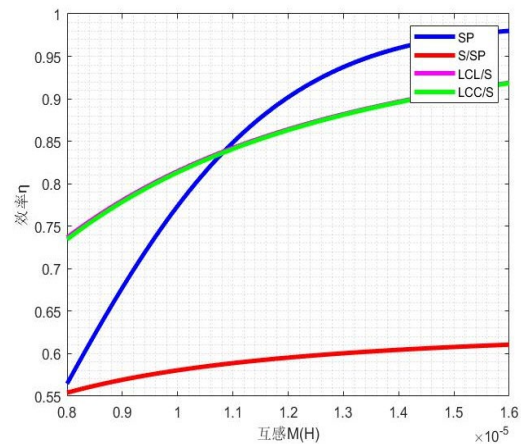


图7 四种拓扑效率随互感变化图

4 总结

本文主要分析了互感偏移对四种谐振补偿拓扑电压增益和效率的影响。SP 拓扑电压增益变化较小,但效率变化较大;S/SP 拓扑电压增益和效率变化较小;LCL/S 与 LCC/S 的电压增益与效率特性相似,电压增益和效率变化相对比较平稳。在工程应用中,需要根据允许的互感偏移大小以及系统参数的允许波动范围,来确定合理的补偿拓扑。

从推导的表达式中可以看到影响电路特性的因素不止有互感,还有等效负载、频率等,且还需考虑各拓扑自身电压等级等,因此在实际应用中,还需多方面的对比,综合考虑选取最优拓扑。

参考文献

- [1] 严开沁,陈乾宏,曹玲玲,张巍,任小永. 串-串补偿与串-并补偿非接触谐振变换器特性分析与控制策略[J]. 南京航空航天大学学报, 2014, 46(01): 101-108.
- [2] 侯佳,陈乾宏,严开沁,李明硕,张强,阮新波. 新型S/SP 补偿的非接触谐振变换器分析与控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 1-9.
- [3] 张辉,王换民,李宁,刘苗苗. 电动汽车无线充电电路互感优化及功效特性分析[J]. 电力电子技术, 2017, 51(03): 104-105.
- [4] 程鹏天,王健强,杜秀. 电动汽车感应耦合充电系统一种新型拓扑的研究[J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 86-91.
- [5] 孙跃,张欢,陶维,马浚豪,李璐,夏金凤. 基于变结构模式的宽负载恒压感应耦合电能传输系统[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(05): 109-114+126.
- [6] 张辉,王换民,李宁,雷艳婷,杨帆,刘苗苗. 电动汽车无线充电混合补偿拓扑电路分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(16): 71-75.
- [7] 张辉,雷艳婷,王换民. 电动汽车 LCC 型无线充电电路特性分析[J]. 电气传动, 2017, 47(08): 63-66+75.
- [8] 程海松,姚友素,王懿杰,刘晓胜,徐殿国. 基于双边 LCC 补偿的无线能量数据传输系统设计[J]. 电工技术学报, 2018, 33(S2): 295-304.
- [9] Zhang W, Mi C C. Compensation Topologies of High-Power Wireless Power Transfer Systems[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2016, 65(6): 4768-4778.
- [10] Ge S, Liu C, Li H, et al. Double-LCL resonant compensation network for electric vehicles wireless power transfer: experimental study and analysis[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(11): 2262-2270.
- [11] Nguyen V T, Yu S D, Yim S W, et al. Optimizing compensation topologies for inductive power transfer at different mutual inductances[C]// IEEE Pels Workshop on Emerging Technologies: Wireless Power Transfer. IEEE, 2017.

作者简介: 张劲霄(1996),男,工学硕士,在读研究生,主要从事无线电能传输系统线圈定位、切换策略的研究工作,19121526@bjtu.edu.cn。