

基于 S-P 结构的非线性宇称时间对称分析

肖伟号,黄旭红

(福建工程学院 电子电气与物理学院,福建 福州 350118)

摘要: 基于非线性宇称时间对称的无线电能传输系统,是一种能在一定耦合区间内保持恒定高效率传输的鲁棒性系统。宇称-时间对称(PT 对称)无线电能传输系统,能够在较大范围内实现对耦合谐振线圈位置的不敏感性,在该区间内可对负载进行恒定的功率传输。基于耦合模理论对 S-P 型结构的 PT 对称无线电能传输电路进行分析,观察其不同耦合区间内系统的传输效率随耦合系数的变化情况进行分析。最后通过 Matlab 等软件进行仿真,结果表明在强耦合区域内系统传输效率不随耦合系数变化而变化,且能保持高效传输,在弱耦合区域耦合系数对系统的传输效率有很大的影响。

关键词: 宇称时间对称;恒定高效率传输;无线电能传输;S-P 型结构;耦合模理论

中图分类号: TN712.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-4348(2022)03-0288-04

Time symmetry analysis of nonlinear parity based on S-P structure

XIAO Weihao, HUANG Xuhong

(School of Electric, Electrical Engineering and Physics, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

Abstract: The wireless power transmission system based on nonlinear parity time symmetry is a robust system that can maintain constant high-efficiency transmission within a certain coupling interval. The parity-time symmetry (PT symmetry) wireless power transmission system can achieve insensitivity to the position of the coupled resonant coil over a wide range, and can perform constant power transmission of the load within this range. Based on the coupled mode theory, the PT symmetric wireless power transmission circuit with S-P structure was analyzed, and the change of the transmission efficiency of the system with the coupling coefficient in different coupling intervals was observed and analyzed. Finally, simulation was carried out with softwares such as Matlab. Results show that the transmission efficiency of the system does not change with the coupling coefficient in the strong coupling region, and can maintain high-efficiency transmission. In the weak coupling region, the coupling coefficient has a great impact on the transmission efficiency of the system.

Keywords: parity time symmetry; constant high-efficiency transmission; wireless power transmission; S-P type structure; coupled mode theory

无线电能传输是借助电磁场或者电磁波传输能量的一种技术,无线电能传输系统功能性好、可靠性高,安全性及使用寿命较高,加上其无接触无磨损的特性,使其能够满足不同条件下多种电工设备的用电需求和信息传输的需求。然而无线电能传输在传输距离上受到很大的限制,随着距离的增

加传输效率会降低,造成电力资源的浪费。此外其传输能量的过程很容易受到耦合线圈位置的变动而变化^[1-2],电子产品要被放置指定的位置方可进行电力传输。
2017 年,斯坦福大学范汕洞教授团队提出非线性宇称时间对称原理增强型无线电能传输,

收稿日期: 2022-04-14
第一作者简介: 肖伟号(1997—),男,安徽界首人,硕士研究生,研究方向:电气工程信息技术。
通信作者: 黄旭红(1969—),女,福建福州人,教授,高级工程师,研究方向:网络通信、图像处理和信号处理。

实现高效电力传输。宇称—时间对称是描述微观物体运动基本理论的量子力学中的概念,一般来讲,物理中的对称性是指一个系统在特定变换下所呈现的内在不变性,宇称—时间对称性即空间反射和时间反演下的不变性^[3],利用这一原理制成的系统可以在约1 m距离的范围内保持电力传输效率不变。基于S-P结构的非线性宇称时间对称电路,根据耦合模理论^[4]对电路进行分析,比一般的无线电能传输电路传输效率更高,能够实现不受耦合谐振线圈位置的变动的影响,从而对电力进行恒定传输,在很大程度上解决了无线电能传输过程中电子产品因没有放置“正确位置”而导致充电效率差、电力资源浪费的问题。

1 模型建立与分析

宇称守恒定律是由许多粒子组成的体系,不论经过的相互作用发生什么变化其总宇称保持不变,即原来为正,相互作用后仍为正;原来为负,相互作用后仍为负^[5-6],这一定律对于许多情况都是正确的。同样,将宇称对称定律应用于无线电能传输里,搭建基于S-P结构的传输电路,目的在于使得传输效率更加高效。研究基于S-P型补偿结构的宇称时间对称电路模型如图1所示。在文献^[7]和^[8]中采用开关器件作为供能端^[7-8]。受文献启示,本研究中增益电路由直流电压源和半桥逆变器组成的结构为发射线圈供电。其中包括发射线圈和接收线圈调谐电容 C_1 、 C_2 ,以及线圈存在的内阻 r_1 、 r_2 , R_L 为负载。忽略半桥逆变器的死区和延迟时间,其中 V_{dc} 为输入电压源。

$$U_{in} = \frac{\text{sgn}(i_{L1}) + 1}{2} V_{dc} \approx \frac{V_{dc}}{\pi}$$

其中 i_{L1} 为发射线圈电流,sgn为符号函数。

耦合模理论(coupled-mode theory, CMT)一般用于研究电磁波之间的耦合规律,是微扰分析法的一种特例,适用于分析谐振模式和传输模式下的物理耦合系统特性。耦合模理论能够真正描述WPT系统能量特性,是分析WPT技术传输特性的基础方法。一般的S-S型以及S-P型WPT系统均可看作两个单独的LC振荡电路通过电磁耦合构成,考虑无损系统仅适用于理论分析,在实际电路中,往往需要考虑损耗以保障参数设计的可靠性。假定 $|a_1|^2$ 、 $|a_2|^2$ 分别为发射线圈和接收线圈包含的能量; w_1 、 w_2 分别为两线圈的固有

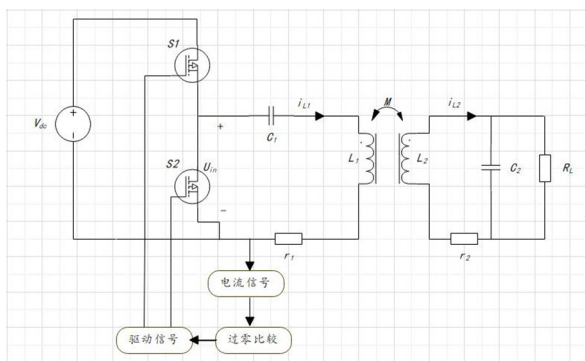


图1 基于S-P结构非线性宇称时间对称电路图

Fig.1 Nonlinear parity time symmetric circuit diagram based on S-P structure

谐振频率; g_1 为发射线圈净增益, k 为两线圈的耦合系数。令 $k = k_{12} = k_{21}$,根据电路建立耦合模模型:

$$\begin{aligned} \frac{da_1}{dt} &= (jw_1 + g_0 - \tau_1) * a_1 - jKa_2 \\ \frac{da_2}{dt} &= (jw_2 - \tau_2 - \tau_L) * a_2 - jKa_1 \end{aligned} \quad (1)$$

其中 g_0 为发射线圈电路总增益, τ_1 、 τ_2 、 τ_L 为发射线圈、接收线圈固有损耗率以及负载损耗率,为了得到稳态状态下的解,建立特征方程如下:

$$[j(w_1 - w) + g_0 - \tau_1] * [j(w_2 - w) - \tau_2 - \tau_L] + k^2 = 0 \quad (2)$$

当电路中发生谐振时有 $w_1 = w_2 = w_0$,

$$\begin{cases} j(w_0 - w) * (g_0 - \tau_1 - \tau_2 - \tau_L) = 0 \\ -(w_0 - w)^2 - (g_0 - \tau_1) * (\tau_2 + \tau_L) + k^2 = 0 \end{cases} \quad (3)$$

根据式(3)可得到稳态解,当 $w \neq w_0$,系统处于强耦合区间,即 $k > \tau_2 + \tau_L$,系统存在两个谐振频率。此时,

$$\begin{aligned} g_0 &= \tau_1 + \tau_2 + \tau_L \\ w &= w_0 \pm \sqrt{k^2 - (\tau_L + \tau_2)^2} \end{aligned} \quad (4)$$

当 $w = w_0$,系统处于弱耦合区间,系统只有一个谐振频率,即式(2)中只有一个解,

$$g_0 = \frac{k^2}{\tau_2 + \tau_L} + \tau_1$$

且此时耦合系数 $k = \tau_2 + \tau_L$ 为临界耦合,

$$\frac{g_1}{\tau_2 + \tau_L} = \frac{k^2}{(\tau_2 + \tau_L)^2} < 1, \text{关系曲线如图2所示。}$$

由式(4)可知系统的谐振频率会随着耦合系

数的变化而变化,从而维持系统的损耗与增益。
系统的输出功率为:

$$P_L = 2 * \tau_L |a_2|^2 \quad (5)$$

同理可求得发射线圈以及接收线圈损耗为:

$$\begin{aligned} P_1 &= 2 * \tau_1 |a_1|^2 \\ P_2 &= 2 * (\tau_2 + \tau_L) * |a_2|^2 \end{aligned} \quad (6)$$

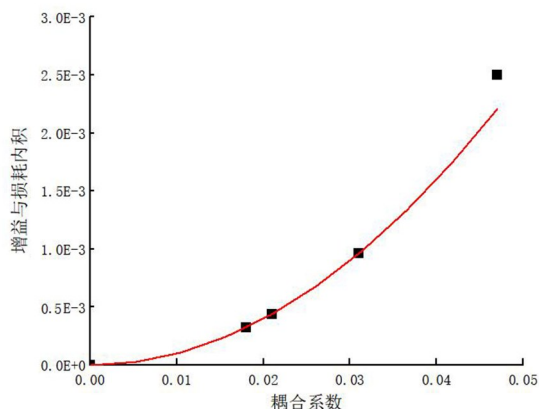


图 2 弱耦合区域内 $g_1^*(\tau_L + \tau_2)$ 与耦合系数关系曲线

Fig.2 Relationship between $g_1^*(\tau_L + \tau_2)$ and coupling coefficient in weak coupling region

图 2 表示的是弱耦合区间发射端净增益与损耗的内积和耦合系数的关系曲线拟合图,实线表示预期效果。根据系统的饱和增益机制,在强耦合区域随着耦合系数的改变,系统工作频率会发生变化,通过改变增益来维持恒定的效率,发射端净增益系数与损耗系数相等,且发射端与接收端膜值相等, $|a_1|/|a_2| = 1$ 。

当系统处于弱耦合区间 ($k < \tau_2 + \tau_L$) 时,随着耦合系数的减小系统增益值也在慢慢变小而损耗在增加,此时接受端的损耗衰减率远大于系统增益,当 $|a_1|$ 小到一定值时,增益电路又会对发射线圈进行供能。如图 2 所示,在耦合系数 $k = 0.047$ 时,发射端净增益与损耗内积和预期是有偏差的,这是因为系统由强耦合区间过渡至弱耦合区间时,随着损耗的慢慢累加,发射端增益并不会突然减小,随着供能电路结束供能,发射端增益开始慢慢减小,系统传输效率随耦合系数的改变而改变。

根据式(5)(6)分析,并对其进行计算,根据:
效率 = 输出功率/输入功率。

可得到如下系统的传输效率为:

$$\eta = \begin{cases} \frac{\tau_L}{\tau_1 + \tau_2 + \tau_L} \longrightarrow \\ w = w_0 \pm \sqrt{k^2 - (\tau_2 + \tau_L)^2}, (k > \tau_2 + \tau_L) \\ \frac{\tau_L * k^2}{\tau_1 * (\tau_2 + \tau_L)^2 + k^2 * (\tau_2 + \tau_L)} \longrightarrow \\ w = w_0, (k < \tau_2 + \tau_L) \end{cases} \quad (7)$$

$$\tau_1 = \frac{r_1}{2L_1} \quad (8)$$

$$\tau_2 = \frac{r_2}{2L_2} \quad (9)$$

$$\tau_L = \frac{R_L}{2L_2} \quad (10)$$

由式(7)可知系统计算出来理论的效率中,在强耦合区间效率会受到发射线圈以及接收线圈自身存在电阻值损耗的干扰,但是由于在实际电路中,发射线圈和接收线圈固有衰减率远远小于负载衰减率,发射线圈和接收线圈以及负载损耗分别为式(8)(9)(10)。可以看到当处于强耦合区间时系统的传输效率接近于 1,表明在此时的传输效率是极高的,且此时的效率与耦合系数无关。根据式(7)验证了当系统处于强耦合区间时,系统的传输效率不再变化,即对线圈位置变化不敏感性,而当系统处于弱耦合区时,系统处于对称破缺状态,传输效率会随着耦合系数的变化而变化,电压、电流特性呈现分段的形式,在不同时刻,增益电路起到不同的作用。

2 仿真分析与实验分析

所谓“宇称”,可简单理解为“左右对称”或“左右交换”。按照这个解释,所谓“宇称不变性”就是“左右交换不变”^[9],有学者利用一侧(初级侧)控制的方法来进行恒功率传输^[10]。为了验证基于 S-P 结构的非线性无线电能传输过程中能量的恒定性,研究结合理论与实践进行仿真实验与分析。

本研究的仿真参数分别设置为:输入电压源 V_{dc} 为 30 V,电感 L_1 、 L_2 设置为 101 μ H,调谐电容 C_1 、 C_2 分别设为 1.1 nF,线圈内阻 r_1 、 r_2 为 1 Ω ,负载阻值 R_L 为 15 Ω ,谐振腔频率 f_0 为 471 kHz。

结合图 1 电路模型和仿真参数以及相关计算可以得到耦合系数与电路频率、电路传输效率的相关拟合曲线,从图 3、4 可以看出拟合曲线极大

的拟合率,但 K 为耦合效率,与 k 耦合系数不同。

$$k = (w \times K)/2 \tag{11}$$

影响传输效率的因素有很多,包括分析不同频带^[11]会对传输功率产生影响,根据本研究分析电路中初始原边和副边谐振腔频率为 $f_0=471\text{ kHz}$,根据式(8)(9)(10)(11)可知电路的临界耦合系数为 $k=0.053$,即当 $k \geq 0.053$ 时,频率开始出现分裂,并且在 $w = w_0$ 时系统增益达到最大。此时处于强耦合区域,系统的效率不随耦合系数的变化而变化。根据 $w = 2\pi * f$ 结合式(4)可分析得到耦合系数和频率之间的关系式为:

$$f = \begin{cases} f_0 \pm \frac{\sqrt{k^2 - (\tau_L + \tau_2)^2}}{2\pi} & (k > \tau_2 + \tau_L) \\ f_0 & (k < \tau_2 + \tau_L) \end{cases} \tag{12}$$

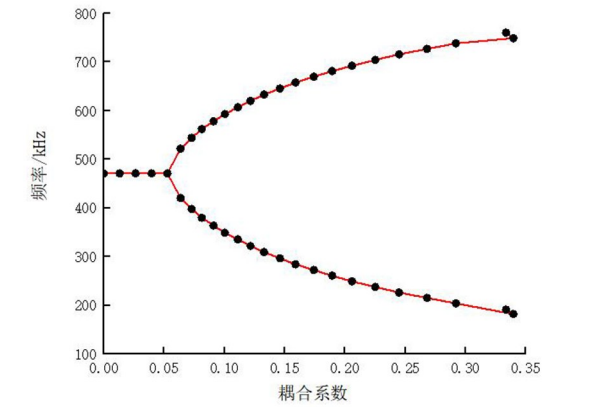


图 3 耦合系数与频率理论值与实验值关系拟合曲线
Fig.3 Fitting curve of the relationship between the coupling coefficient and frequency's theoretical value and experimental value

耦合系数与系统传递效率以及耦合系数与频率关系的仿真拟合曲线如图 3、4 所示,由图 3 可知当系统频率大于 0.052 74 时系统中出现频率分裂,系统的传递效率不再随耦合系数的变化而变化,与理论分析中临界耦合系数为 0.053 时分析结果一致,且由图 4 可以看出传递效率达到 90% 以上,且以后不再随耦合系数的递增而变化,表明了**在强耦合区域内,无线电能传输过程中的功率的恒定性。**

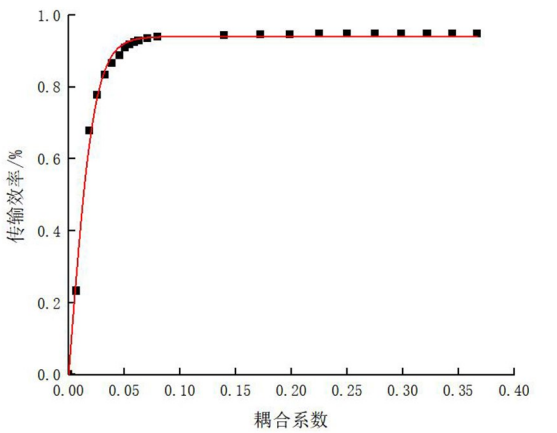


图 4 耦合系数与系统效率理论值与实验值关系拟合曲线
Fig.4 Fitting curve of the relationship between the theoretical value and the experimental value of the coupling coefficient and the system efficiency

3 结论

根据第 2 节仿真参数进行实验,在保持直流输入电压 V_{dc} 为 30 V,在强耦合区域,输入电压保持在 10 V 左右,功率 15 W,传输效率达 92%,且 PT 对称系统具有频率自适应系统能力,仿真结果符合耦合模理论。研究通过对基于 S-P 型结构的 PT 对称的 WPT 系统电路进行分析,采用半桥逆变器作为负电阻为电路供电,通过耦合模理论对其分析维持恒定高效传输的机理,建立状态方程表达式,并根据系统结构对负载进行参数设计以及仿真实验分析验证了在 PT 对称强耦合区域内,系统传输效率的高效性和对耦合系数变化的不敏感性。通过耦合模建模分析可知,研究所提高品质输电能力的全方向无线电能传输系统必须具备两个条件:原副边的固有谐振频率相等,即 $w_1 = w_2 = w_0$;另外线圈之间的耦合系数足够大,线圈的品质因数尽可能大,以降低系统损耗。基于 S-P 型结构的 PT 对称的无线电能传输系统在一定程度上解决了因位置变动而带来的困扰,而且传输效率高,对无线电能传输的发展具有重要意义。

参考文献:

[1] 张波, 疏许健, 吴理豪, 等. 无线电能传输技术亟待解决的问题及对策[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(18): 1-12.
[2] 张政. 基于 PT 对称原理的全方向无线电能传输系统建模与分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.

参考文献:

[1] 王云才,刘滨谊. 论中国乡村景观及乡村景观规划[J]. 中国园林, 2003, 19(1): 55-58.

[2] 葛韵宇,李方正. 基于主导生态系统服务功能识别的北京市乡村景观提升策略研究[J]. 中国园林, 2020, 36(1): 25-30.

[3] 蔡雪雄,苏小凤,许安心. 基于 AHP-熵值法的乡村生态宜居评价研究:以福建省为例[J]. 福建论坛(人文社会科学版), 2021(9): 86-94.

[4] 于婷婷,袁青,冷红. 县域乡村景观脆弱性评价研究:以哈尔滨县域为例[J]. 中国园林, 2019, 35(11): 87-91.

[5] 马晓旭,华宇佳. 乡村生态振兴成效评价指标体系构建研究:基于江苏省、浙江省、安徽省的对比[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(1): 60-67.

[6] 龚杰. 上海乡村景观使用后评价(POE)及其营建对策研究[D]. 上海:上海交通大学, 2011.

[7] 黄光智. 济南市乡村景观评价及提升策略研究[D]. 济南:山东建筑大学, 2021.

[8] 张羽清,徐媛媛,周武忠. 基于江南文化的乡村景观评价研究[J]. 世界农业, 2021(6): 92-99.

[9] 李宇奇,罗奕爽,黎燕琼,等. 基于 AHP 法的乡村景观质量评价体系构建:以川西林盘为例[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 263-268.

[10] 汪朝飞. 基于旅游扶贫的楚雄州乡村景观分布特征及质量评价[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(9): 218-224.

[11] 梁振然,任爽. 桂林市乡村园林景观分布特征及评价研究[J]. 中国农业资源与区划, 2018, 39(4): 221-225.

[12] 国务院农村综合改革工作小组办公室. 美丽乡村建设指南: GB/T 32000-2015[S]. 北京:中国标准出版社, 2015.

[13] 雷文韬,黄明华,谢宏坤. 湘西州典型乡村聚落景观空间分异特征及驱动因素分析[J]. 中国农业资源与区划, 2021, 42(6): 146-154.

[14] 于佳,王雷. 基于美丽乡村建设的乡村景观评价体系初探[J]. 农业经济, 2021(9): 45-46.

[15] 谢花林,刘黎明,李振鹏. 城市边缘区乡村景观评价方法研究[J]. 地理与地理信息科学, 2003, 19(3): 101-104.

[16] 郭亚军. 综合评价理论、方法及应用[M]. 北京:科学出版社, 2007: 44-51.

[17] 汪培庄. 模糊集合论及其应用[M]. 上海:上海科学技术出版社, 1983: 33-76.

[18] 张杰辉,尧杰辉. 基于 G1-FUZZY 的装配式建筑成本风险评价研究[J]. 江西建材, 2021(9): 298-301, 303.

(责任编辑:王圆圆)

(上接第 291 页)

[3] ZHU H J, ZHANG B, WU L H. Output power stabilization for wireless power transfer system employing primary-side-only control[J]. IEEE Access, 2020, 8: 63735-63747.

[4] 张波,荣超,江彦伟,等. 分数阶无线电能传输机理的提出及研究进展[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(4): 197-207.

[5] 赵志友. 基于宇称时间对称的无线电能传输系统电路模型及分析[D]. 广州:华南理工大学, 2018.

[6] 刘功俊. 考虑方向和距离变化的无线电能传输系统耦合模模型与机理研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.

[7] 韩成建,陈为,郑宗华. 基于非线性宇称时间对称理论的 WPT 分析与设计[J]. 电力电子技术, 2020, 54(4): 4-7, 25.

[8] 郑益田,郑宗华,陈庆彬. 基于开关器件的非线性宇称时间对称无线电能传输系统[J]. 电器与能效管理技术, 2020(4): 62-66.

[9] YE Z L, YANG M Y, CHEN P Y. Multi-band parity-time-symmetric wireless power transfer systems[C] // 2021 IEEE Wireless Power Transfer Conference. June 1-4, 2021, San Diego, CA, USA. IEEE, 2021: 1-4.

[10] 王少伍,程木田,胡伟. 基于原边控制的宇称时间对称无线电能传输[J]. 电气应用, 2021, 40(7): 37-42, 61.

[11] 韩冲. 本征频率恒定控制的无线电能传输系统研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.

(责任编辑:方素华)