

# 谐振式无线电能传输系统最大功率点跟踪控制方法

赵崇焱<sup>1</sup> 乔征瑞<sup>1</sup>

ZHAO Chongyan QIAO Zhengrui

## 摘要

谐振式无线电能传输系统中电源线圈、负载线圈分别与集总电容相连接,电源线圈会与发射线圈产生磁谐振,在非过耦合区域传输过程中,系统会出现接近频率临界分裂现象,将系统电容视为固定不变,降低功率点跟踪控制占空比。为此,文章提出一种谐振式无线电能传输系统最大功率点跟踪控制方法。通过构建谐振运动交变函数,利用等效电路理论,计算系统功率效率,分析功率效率随互感值的变化情况,并利用互感值计算此时的电容值,应对频率临界分裂现象。以不同电容组修正电容值作为控制约束条件,动态修正系统的电容值,调整系统的谐振频率,实现最大功率点的跟踪控制。实验结果表明,设计方法的跟踪控制占空比较高,具有可靠性,有一定的应用价值,为提高无线电能传输系统传输质量,降低传输功率损耗作出了一定的贡献。

## 关键词

谐振式;无线电能传输系统;最大功率点;跟踪控制

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2025.02.014

## 0 引言

谐振式无线电能传输功率系统是一种特殊的磁耦合系统,主要由发射、接收线圈组成,通过容抗抵消作用完成电磁共振<sup>[1]</sup>,进行电能传递。相较于传统的有线电能传输,谐振式无线电能传输具有灵活和极强的环境适应能力等优点,在城市交通、手机移动设备等领域具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。然而,在非过耦合区域传输过程中,当系统工作频率接近某个临界值时,会立即产生频率分裂点,系统的实际工作效率会偏离最佳工作效率,从而降低功率点跟踪控制的占空比,影响系统的传输效率和输出功率<sup>[3-4]</sup>。因此,研究最大功率点跟踪控制技术,以提高系统的传输效率和输出功率,具有重要的现实意义和应用价值。

相关研究人员针对谐振式无线传输系统特征设计了几种最大功率点跟踪控制方法。基于改进模糊控制算法的最大功率点跟踪控制方法确定了自适应跟踪步长<sup>[5]</sup>,结合不确定性进行控制调整。然而,在实际应用中的系统电容受温度变化、负载变化等影响,是动态变化的,产生频率临界分裂,将电容设置为定值,会降低最大功率点跟踪效率。考虑局部遮阴的最大功率点跟踪控制方法生成了Levy控制策略<sup>[6]</sup>,通过扰动观察实现局部跟踪,但该方法主要依赖于随机游走理论

进行搜索,缺乏根据系统参数变化进行动态调整的能力。当系统电容发生变化时,无法及时感知并调整控制策略,导致系统工作在非最佳状态。

为了降低电能功率损耗,本文设计了一种有效的谐振式无线电能传输系统最大功率点跟踪控制方法。

## 1 电能传输系统最大功率点跟踪控制方法设计

### 1.1 谐振式无线电能传输系统功率效率计算

最大功率点跟踪控制的目标是使系统始终工作在能够输出最大功率的点上。然而,在谐振式无线电能传输系统中,当电源线圈与集总电容连接后,会形成特定的谐振频率。如果这个谐振频率与发射线圈产生的磁谐振频率不匹配,在接近频率临界分裂点时,系统的传输功率会突然下降,或者出现不稳定的情况。因此,根据法拉第定律构建电场与磁场的转换方程,并通过分析系统的耦合运动规律,提出了谐振运动交变函数。利用等效电路理论,计算系统功率效率,评估功率点跟踪控制在应对频率临界分裂现象时的有效性,从而进一步实现功率点跟踪控制寻优,为优化功率点跟踪控制策略提供依据。

在谐振式无线电能传输系统运行的过程中,内部电场会不断变化产生磁场,因此两者具有一定的转化关系,根据法拉第定律生成的磁场电场转换方程为:

$$\rho = \nabla \cdot D \quad (1)$$

式中: $\nabla$ 代表电场强度; $D$ 代表电位移; $\rho$ 代表磁通量转换密度<sup>[7]</sup>。

1. 郑州西亚斯学院电信与智能制造学院 河南郑州 450000

[基金项目] 郑州西亚斯学院校级科研项目青年项目(2023-E095)

当传输系统处于稳态时线圈的谐振运动幅值会随之改变,此时获取串联电路谐振条件,使其满足工作电压与工作频率要求。而磁谐振会导致磁场和电场能量的周期性转换,这种周期性的能量转换可以用谐振运动交变函数来表示。假设传输系统存在一定的耦合运动规律,则其最大功率点需要满足谐振条件要求,生成的谐振运动交变函数  $a_p(t)$  为:

$$a_p(t) = iw_p + ik_p a(t) + \rho F(t) \quad (2)$$

式中:  $i$  代表功率点移动单位;  $w_p$  代表线圈运动角频率;  $k_p$  代表控制耦合系数;  $a(t)$  代表线圈运动量;  $F(t)$  代表谐振衰减[8]。

当无功功率最小时,意味着系统处于较为理想的工作状态,此时线圈之间的耦合效果最佳,互感值也相应达到一个较为稳定的水平[9]。在功率点跟踪控制中,调整工作频率是实现最大功率输出的关键。而回路阻抗与工作频率之间存在一定的关系。通过计算回路阻抗,可以更加准确地确定系统在不同工作频率下的性能表现,从而找到最佳的工作频率点。计算此时的回路阻抗  $J$  为:

$$J = a_p(t) \frac{1}{j\omega C} \quad (3)$$

式中:  $j$  代表基尔霍夫系数;  $\omega$  代表随机功率输出效率;  $C$  代表谐振无功功率。基于此,计算谐振式无线电能传输系统功率效率  $\eta$  公式为:

$$\begin{cases} P_0 = I \cdot J \\ \eta = \frac{P_0 (w_0 M)^2 J}{R_s} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $P_0$  为传输系统功率;  $I$  代表高频电流;  $w_0$  代表非谐振功率值;  $M$  代表负载效率;  $R_s$  代表集成电阻。

在非过耦合区域存在频率临界分裂现象的情况下,根据上述计算的谐振式无线电能传输系统功率效率  $\eta$  调整随机频率[10],避免系统陷入频率临界分裂状态,从而实现功率点跟踪定位寻优。

## 1.2 基于约束条件的最大功率点跟踪控制

在非过耦合区域,考虑到接近频率临界分裂现象,需要防止系统进入不稳定的频率区域,因此设置约束条件[11]。当功率效率  $\eta$  达到最大值时,对应的谐振式无线电能传输系统互感值即为在当前系统条件下实现最大功率传输的关键值。由于互感值影响着能量在发射线圈和接收线圈之间的传输,不同的互感值会导致不同的功率效率,通过分析功率效率  $\eta$  随互感值的变化情况,可以确定最大功率点对应的互感值,以修正功率点跟踪峰值以应对频率临界分裂现象[12-13]。在谐振式无线电能传输系统中,电容值对系统的谐振状态和功率

传输效率有着关键影响。不同的工作条件和负载变化会导致系统偏离最大功率点,而通过不同电容组可以灵活地调整系统的电容值,进而改变系统的谐振频率和阻抗匹配情况。控制约束条件则确保电容值的调整在合理范围内,既能保证系统稳定运行,又能使系统根据实际工况动态优化电容值,让系统始终工作在接近最大功率点的状态,从而提高无线电能传输的效率和性能[14]。

当耦合线圈距离超出阈值时,可能出现频率临界分裂现象,根据最大功率点的跟踪控制互感值修正功率点跟踪峰值。随着耦合线圈距离缩短,其频率临界分裂一致性随之下降,可以调节系统频率,补偿谐振式无线电能传输电容,提高跟踪控制精度,此时在最大功率点的跟踪控制互感值  $M$  为:

$$M = \frac{\eta \sqrt{R_l(R_l + R_l)}}{\omega} \quad (5)$$

式中:  $R_l$  代表最大功率传输匹配线圈电阻;  $R_l$  代表互感电阻;  $\omega$  代表匹配谐振频率。

当线圈耦合距离发生变化后,其原始的功率点补偿难度增加,无法实现最大功率点跟踪[15],因此,对电容展开补偿,更新谐振频率关系,计算此时的电容值  $C$  为:

$$C = M \cdot \left( \frac{1}{2\pi f \sqrt{L}} \right)^2 \quad (6)$$

式中:  $f$  代表补偿频率;  $L$  代表耦合线圈距离。

不同电容组的量级不同,控制通断状态与电容并联效果有关,因此,本文设计的最大功率点跟踪方法以不同的电容组为例修正电容值  $C$ ,采集计算负载功率,得到的最大功率点跟踪控制约束条件  $C_{eq}$  公式为:

$$C_{eq} = SC + S_m C_m \quad (7)$$

式中:  $S$  代表谐振波动电容;  $S_m$  代表等效跟踪矩阵;  $C_m$  代表负载融合功率。

根据上述控制约束条件,利用扰动观察法进行负载功率与谐振电容比对,优化开关配置,以负载两端采集电压为主实现跟踪控制。

当线圈电容未发生变化时,原始的互感值可以看成临界值,基于此进行耦合状态匹配,利用鉴相器调整逆变相位信号。结合上述的约束条件可以有效降低处理限制,结合电能传输波动特性进行针对调整,最大程度上提高功率点跟踪控制的综合可靠性。

## 2 实验

### 2.1 实验准备

为了验证设计的谐振式无线电能传输系统最大功率点跟

踪控制方法的控制效果,根据谐振式无线电能传输系统最大功率点跟踪控制实验要求,选取 MCR-WPT 作为实验平台,该实验平台主要由直流电源、逆变电路等组成,可以有效调整信号驱动状态,执行实验指令。启动直流电源,通过全桥式逆变电路将直流电转换为高频交流电,并通过谐振线圈进行无线传输。接收端接收到的无线电能通过 Buck-Boost 电路进行电压转换,得到稳定的直流输出电压。该实验平台组成示意图如图 1 所示。

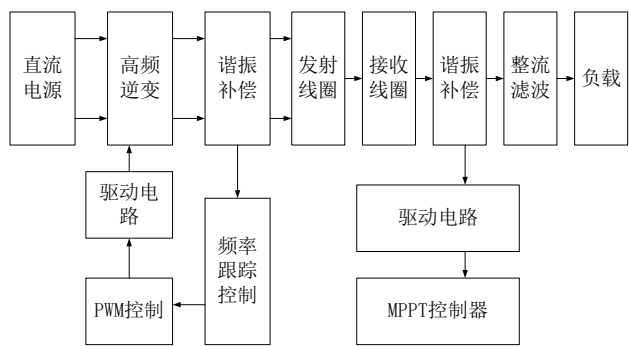


图 1 MCR-WPT 实验平台

由图 1 可知,该实验平台可以通过发射谐振耦合作用保持实验参数一致,按照交直流转化关系计算实验负载功率,得到最优临界耦合负载。

实验线圈不同的缠绕方式对实验磁场分布存在一定影响,本实验根据线圈基础特性选取螺旋管式谐振线圈结构,该线圈半径为 10 cm,线圈匝数为 8 匝,匝间距为 3 mm,导线线径为 0.4 mm,并设置谐振频率为 6.78 MHz。该线圈的电感参数分布合理,满足损耗电阻要求。当线圈处于高频谐振状态时,谐振式无线电能传输系统结构图如图 2 所示。

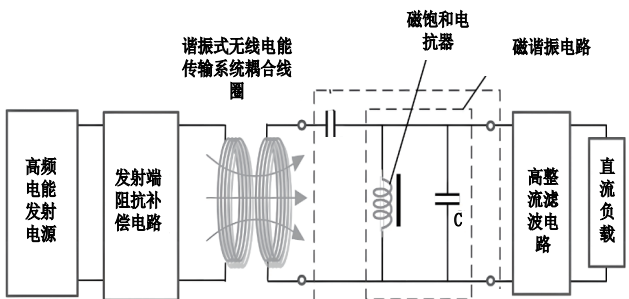


图 2 谐振式无线电能传输系统结构图

在谐振过程中,选取 10 nF/1000 V CBB 电容作为实验电容,通过全桥式逆变电路进行无线传输。待上述步骤完毕后,可以完成 Buck-Boost 电压转换,得到最大功率点跟踪控制实验结果。

2.2 实验结果与讨论

分别使用本文设计的最大功率点跟踪控制方法,将其与

文献 [5] 提出的基于改进模糊控制算法的最大功率点跟踪控制方法以及文献 [6] 提出的考虑局部遮阴的最大功率点跟踪控制进行控制。设定模式 I 为稳定光照,光照强度为一个固定值 1000 W/m<sup>2</sup>,并且光照角度保持不变;模式 II 为渐变光照,照强度从初始的 800 W/m<sup>2</sup> 开始,以一定的速率(如 50 W/m<sup>2</sup> 每 10 min)逐渐增加到 1200 W/m<sup>2</sup>,同时光照角度也可以有小幅度的变化(如每 10 min 改变 5°);模式 III 为突变光照,初始光照强度为 1000 W/m<sup>2</sup>,突然在某个时刻(实验开始 15 min 后)降低到 600 W/m<sup>2</sup>,然后再经过 10 min 后,突然增加到 1200 W/m<sup>2</sup>,光照角度也有较大幅度的突变(如突然改变 30°)。在以上 3 种运行模式下,利用 MATLAB 模糊工具箱得到的实验结果如表 1 所示。

表 1 实验结果

| 跟踪控制方法    | 运行模式 | 跟踪波动率 /% | 跟踪精度 Map/% | 功率点跟踪控制占空比 /% |
|-----------|------|----------|------------|---------------|
| 本文方法      | I    | 0.03     | 99.2       | 85.2          |
|           | II   | 0.02     | 98.3       | 72.3          |
|           | III  | 0.01     | 97.6       | 73.6          |
| 文献 [5] 方法 | I    | 1.36     | 78.5       | 56.5          |
|           | II   | 2.69     | 75.9       | 49.8          |
|           | III  | 2.38     | 66.8       | 47.7          |
| 文献 [6] 方法 | I    | 2.84     | 62.4       | 35.6          |
|           | II   | 1.22     | 73.5       | 52.2          |
|           | III  | 1.69     | 64.9       | 46.3          |

由表 1 可知,本文方法在模式 I 下的占空比最高,达到 85.2%,跟踪波动率低、跟踪精度高,在其他模式下也保持相对较高的水平。随着运行模式的改变,跟踪波动率和跟踪精度略有变化,但整体保持稳定。占空比在不同运行模式下有所差异,但均保持在较高水平。其他两种方法的占空比普遍较低,且在不同运行模式下波动较大。这主要是因为研究方法通过分析功率效率随互感值的变化情况及利用互感值计算电容值,可准确把握系统关键参数间的关系,有效应对频率临界分裂现象。而以不同电容组修正电容值作为控制约束条件动态修正电容值、调整谐振频率,能使系统根据实际工况灵活且精准地适配,让系统始终更接近最大功率点运行,减少了因工况变化导致的功率波动,从而提高了占空比,降低了跟踪波动率,同时也保证了对最大功率点的跟踪精度。

不同输入电压下传输系统的谐振不同。使用 3 种方法进行最大功率点跟踪控制,以发电功率作为指标,判断不同方法的功率跟踪稳态性能,得到的跟踪效率实验结果如图 3 所示。



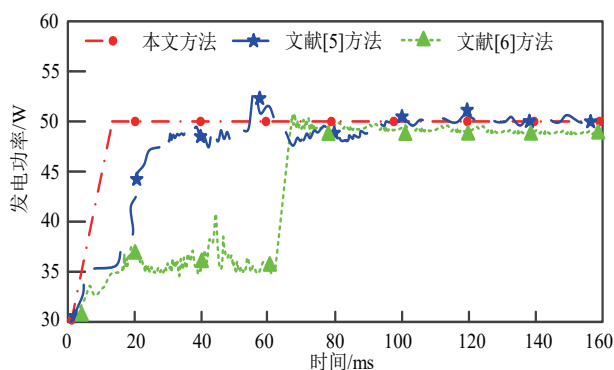


图3 功率跟踪稳态性能比较

由图3可知，本文方法的最大输出功率点波动最小，且在10ms后逐渐趋于稳态，而其他对比方法的波动程度相对较大。通过对比表明，本文方法具有更好的稳定性，能够保持谐振式无线电能传输系统最大功率点在较为稳定的状态。这主要是因为研究方法构建了谐振运动交变函数并借助等效电路理论计算系统功率效率，能够准确把握系统的功率特性；接着分析功率效率随互感值的变化情况以及利用互感值计算电容值，可精准地掌握系统在不同状态下的关键参数关系，有效应对频率临界分裂现象对功率的影响。由此可知，本文设计方法具有显著优势，有一定的应用价值。

### 3 结语

谐振式无线电能传输系统是一种基础传输媒介，传输效率较高、传输功率较大，但容易受标准化兼容作用影响导致功率损耗过高。进行最大功率点跟踪控制可以消除交变磁场干扰，降低频率分裂发生频率，因此，本文设计了一种有效的谐振式无线电能传输系统最大功率点跟踪控制方法。实验结果表明，设计的最大功率点跟踪控制方法的跟踪控制占空比较低，跟踪控制效果较好，具有可靠性，有一定的应用价值，为降低电磁污染，保持各工控电能传输稳定性作出了一定的贡献。

### 参考文献：

- [1] 裴春博, 姚文龙, 池荣虎. 船舶光伏发电最大功率点跟踪无模型自适应控制[J]. 青岛科技大学学报(自然科学版), 2024, 45(3): 125-131.
- [2] 赵紫帆, 孙冠群, 杨建青, 等. 一种开关磁阻风力发电机新型功率变换系统及其最大功率点跟踪控制[J]. 电气技术, 2024, 25(4): 1-6.
- [3] 王艺博, 苏高民, 邱榕鑫. 基于跃变探索式电导增量法的光伏阵列全局最大功率点跟踪控制研究[J]. 电气工程学报, 2024, 19(1): 351-357.

- [4] 李圣清, 陈欣, 文颜焱, 等. 基于改进非奇异快速终端滑模反演控制的风力发电系统最大功率跟踪[J]. 湖南电力, 2023, 43(5): 109-115.
- [5] 国珍, 叶明浩, 张腾龙, 等. 基于改进模糊控制算法的光伏发电最大功率点跟踪技术研究[J]. 青岛理工大学学报, 2024, 45(4): 163-172.
- [6] 朱福宝, 付文龙, 张海荣, 等. 局部遮荫下基于改进金枪鱼算法的光伏最大功率点跟踪控制[J]. 热力发电, 2024, 53(6): 30-38.
- [7] 李红伟, 明兴莹, 罗华林, 等. 基于改进灰狼优化的开关磁阻风力发电最大功率点跟踪控制策略[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(26): 11224-11231.
- [8] 付俊峰, 邓福伟, 黄子胜, 等. 自适应趋近律滑模控制的光伏系统最大功率点跟踪控制[J]. 实验室研究与探索, 2023, 42(7): 104-108.
- [9] 屈繁, 胡慧, 徐睿婷, 等. 一种带有前馈补偿的L1神经网络风机最大功率点跟踪控制方法[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2023, 33(2): 14-21.
- [10] 买买提热依木·阿布力孜, 刘谨言, 项志成, 等. 因果图研究双馈风电系统最大功率跟踪控制[J]. 计算机仿真, 2022, 39(11): 100-103.
- [11] 周连俊, 李群, 殷明慧, 等. 面向风电机组最大功率点跟踪的转矩曲线增益动态优化[J]. 电工技术学报, 2023, 38(13): 3447-3458.
- [12] 杨博, 谢蕊, 武少聪, 等. 基于指数分布优化器的混合光伏-温差系统最大功率点跟踪[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(16): 12-25.
- [13] 张秘源, 蔡希彪, 王新凯, 等. 基于长短期记忆网络-模糊控制的光伏最大功率点跟踪算法[J]. 电子器件, 2024, 47(1): 201-208.
- [14] 韩翔宇, 纽春萍, 何海龙, 等. 基于优化增量电导法的温差发电最大功率点跟踪策略[J]. 高压电器, 2023, 59(11): 240-249.
- [15] 毛明轩, 冯心营, 陈思宇, 等. 基于贝叶斯优化卷积神经网络的路面光伏阵列最大功率点电压预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 620-631.

### 【作者简介】

赵崇焱(1993—), 男, 河南郑州人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 无线电能传输、交直流变换器。

乔征瑞(1996—), 男, 河南南阳人, 硕士研究生, 助教, 研究方向: 复杂系统建模与控制。

(收稿日期: 2024-10-21)