

模型预测控制在输电线路监测装置无线电能传输技术中的应用

雷翔宇¹, 武怡玲¹, 周兴昊¹, 周哲民¹, 陈宇超¹, 姜雨枫²

(1. 国网湖北省电力有限公司武汉供电公司, 湖北 武汉 430000; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 无线电能传输技术(WPT)因具有优越的安全性与可靠性, 广泛运用在各个领域, 在高压输电线路监测装置上能减少传统带电插拔充电方式产生的电火花等安全隐患。然而, 传统输电线路监测设备的无线电能传输技术通常为开环控制, 使得在恶劣多变的野外环境中系统输出电压出现不可控的波动, 影响监测设备的性能和寿命。针对这一问题, 将 Buck-Boost 电路添加在 WPT 系统的接收端, 并且利用模型预测控制保证输出电压的稳定与快速跟踪。对新拓扑结构的电路进行建模与分析, 并且在不同工况下对模型预测控制算法的性能进行测试。仿真结果表明, 该拓扑结构和控制算法能够有效控制 WPT 的输出电压, 当输入电压与负载发生变化时, 输出电压基本保持稳定, 非常适用于高压输电线路的监测装置。
关键词: 无线电能传输; 模型预测控制; 变换器; 电压稳定

Application of model predictive control in wireless power transfer technology for transmission line monitoring devices

LEI Xiangyu¹, WU Yiling¹, ZHOU Xinghao¹, ZHOU Zhemin¹, CHEN Yuchao¹, JIANG Yufeng²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company Wuhan Power Supply Company, Wuhan 430000, China;
2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Wireless power transfer (WPT) technology, due to its superior safety and reliability, is widely applied in various fields. When used in high-voltage transmission line monitoring devices, it reduces safety hazards such as electric sparks caused by traditional live plug-in charging methods. However, the WPT technology in conventional transmission line monitoring equipment is typically open-loop controlled, leading to uncontrollable fluctuations in system output voltage in harsh and variable outdoor environments, which affects the performance and lifespan of monitoring devices. To address this issue, this paper adds a Buck-boost circuit to the receiver end of the WPT system and employs model predictive control (MPC) to ensure stable and fast tracking of the output voltage. By modeling and analyzing the new topology circuit and testing the performance of the model predictive control algorithm under different operating conditions, simulation results demonstrate that this topology and control algorithm can effectively control the output voltage of WPT and maintain voltage stability when input voltage and load vary, making it highly suitable for high-voltage transmission line monitoring devices.

Keywords: wireless power transfer; model predictive control; converter; voltage stability

0 引言

人类社会进入电气时代以来,电能给社会生活许多方面都带来了极大的便利,有力推动了社会的发展。随着技术日新月异的更迭,电能接入方式成为关注的焦点。传统有线供电存在灵活性不够、线路裸露、磨损及老化等问题,这无疑会降低供电过程的安全性和可靠性^[1-2]。

无线电能传输(Wireless Power Transfer, WPT)技术是指一种借助空间介质载体,而非传统的导线接触方式,实现电源与负载端电能传输的技术^[3],其中空间介质载体包括磁场^[4-5]、电场^[6]、激光^[7]、微波^[8]和超声波^[9]等方式。磁耦合无线电能传输(Magnetic Coupling Wireless Power Transfer, MC-WPT)是目前WPT技术领域中的一大研究热点,MC-WPT技术将磁场作为传输介质,通过高频交变的磁场与电能相互转换实现电能在一二次之间的无线传输。该技术自诞生以来便得到了国内外学者的关注,应用的领域也越来越广泛,目前MC-WPT已经成功应用于消费电子^[10]、生物医疗^[11]、电动汽车^[12-13]、水下及特殊场所^[14-15]等诸多领域。

WPT技术在输电线路装置中的应用具有广阔的前景,能够解决传统输电中的诸多问题,如线路损耗、设备维护和环境限制等。输电线路监测与维护相关的应用场景中,输电线路上的传感器和监测设备需要持续供电,传统方式依赖电池或太阳能,但存在寿命和稳定性问题。通过WPT技术,可远程为这些设备供电,确保其长期稳定运行,减少维护需求。文献[16]首次提出高压输电线路在线监测设备的无线供电方式。无线供电实验系统的传输距离为1.2 m,传输效率为46%,初步验证了谐振无线供电技术用于高压输电线路在线监测设备的可行性。由于风、雨、地震等因素的影响,发射线圈和接收线圈之间的位置偏差是不可避免的。然而,现有的无线传输无法从根本上解决接收线圈和发射线圈位置偏转导致的传输性能下降问题,仅采用一些技术手段来减少线圈位置偏差的影响^[17]。为了解决因接收线圈和发

射线圈的位置偏差、输入电压波动等因素引起的WPT系统输出电压波动问题,通常在WPT的输出端串联降压-升压DC/DC变换器。降压-升压变换器有很多类型,包括半桥型、全桥型和反激型等^[18-19]。由于电路需要在环境恶劣的输电线路附近工作,有必要选择结构简单、元件少且控制简单的电路拓扑。

为了尽可能延长监控设备的寿命,有必要确保电源电压的稳定性,而一个优秀的控制器是必不可少的。模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)的性能优于传统的比例积分微分(PID)控制^[20],可以满足本文的需求。MPC通过在线优化未来一段时间内的控制输入,实现对系统的精确控制。近年来,随着人工智能相关技术的发展,基于虚拟MPC的人工神经网络控制器(ANN-MPC)等先进控制技术逐渐被挖掘出来,并广泛应用于永磁同步电动机等设备中^[21]。此外,MPC技术可减轻直流微电网内恒功率负载的输入阻抗和直流链路的输出阻抗之间的阻抗失配问题,通过配合观测器能进一步提升系统的控制性能^[22]。对于传统的WPT系统,MPC方法在该系统上的应用并不多见,仅有少量的文章对此方面有过研究。文献[23]将MPC方法运用于水下WPT系统,克服了水下环境给WPT系统带来的影响,保证了负载输出电压的恒定。文献[24]将MPC与扰动观察法应用于WPT系统,实现了系统的动态跟踪,提升了系统传输效率,其中,扰动观察法的使用保证系统传输效率始终处在最大值附近。此外,MPC在WPT系统的应用也广泛使用在电动汽车中,极大提升了电动汽车的充电功率与传输效率^[25]。

本文针对传统高压输电线路监测装置供电存在的安全隐患等问题,引入无线电能传输技术,保证了监测装置的供电可靠性与安全性。并结合MPC,提高了系统的稳定性,当外部环境发生变化时,监测装置能够获得高效稳定的电能供给,并通过PLECS软件仿真证实了方法的可靠性。

1 WPT系统简介

高压直流输电线路的在线监测设备为电网的安全运行提供了重要支持。然而，大多数输电线路位于恶劣多变的野外环境中。如何为在线监测设备提供安全、稳定和连续的电源，引起了众多研究者的关注。目前，高压输电线路在线监测设备的主要供电方式包括电池供电、环境供电和线路感应供电。电池的寿命有限，需要定期更换。环境电力供应包括风力发电、太阳能发电和热电发电等，但它们都容易受到天气条件的影响，通常难以保持稳定的电力供应。与其他供电方式相比，线路感应供电因其能够连续可靠地输出电力而得到广泛应用。为确保安全，监测设备必须与输电线路保持一定的安全绝缘距离。为了解决安全绝缘距离的问题，通常在供电后通过WPT系统向监控设备供电。WPT系统整体框架如图1所示。

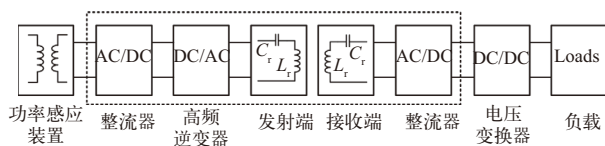


图1 WPT系统整体框架

Fig. 1 Overall framework of WPT system

1.1 LCC-S高阶补偿拓扑

高压输电线路电力监测装置可能受到环境或者天气因素的干扰，导致设备不能正常工作。为了保证实际工作现场设备的正常稳定运行，本文采用LCC-S高阶补偿网络拓扑作为系统的主要结构，当负载侧发生变化时，输出电压能够保持恒定。构成LCC-S高阶补偿网络拓扑如图2所示。LCC-S高阶补偿拓扑网络的直流输入电量经过高频逆变后会得到高频方波电量，经过整个电路的滤波效应，主要流通电量形式将是方波中的基波成分，因此可以采用基波分析法（Fundamental Harmonics Approximation, FHA）对其进行研究。

图2中， U_p 为直流电源经高频逆变后得到的交流等效电压源； L_{f1} 为补偿电感； R_{f1} 为补偿电

感的寄生电阻； C_{f1} 为对 L_{f1} 进行谐振补偿的谐振电容； C_1 、 C_2 分别为一次、二次的谐振补偿电容； L_1 、 L_2 分别为发射线圈和接收线圈的等效电感； R_1 、 R_2 分别为发射线圈和接收线圈的等效寄生电阻； M 为发射线圈和接收线圈的耦合互感； R_L 为交流等效负载； I_1 、 I_2 分别为线圈的一次和二次电流。

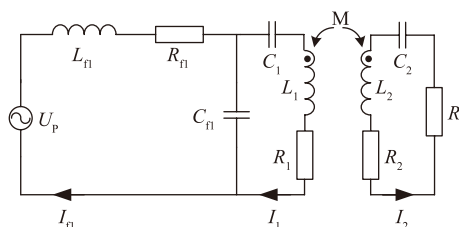


图2 LCC-S高阶补偿拓扑等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of LCC-S high order compensation topology

由电路理论可知，为了满足输入电压、电流零相角特性，此时LCC-S补偿拓扑需要一次侧发射电路处于谐振状态，一次电感电容和一次补偿电感电容需要谐振匹配，即

$$\omega L_{f1} = \frac{1}{\omega C_{f1}} = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \quad (1)$$

根据图2所示，二次回路总阻抗为

$$Z_s = R_L + R_2 + j\omega L_2 + \frac{1}{j\omega C_2} \quad (2)$$

根据互感理论，将二次回路总阻抗映射到一次回路，映射阻抗为

$$Z_r = \frac{-j\omega M \dot{I}_L}{\dot{I}_2} = \frac{-j\omega M}{\dot{I}_2} \frac{j\omega M \dot{I}_2}{Z_s} = \frac{(\omega M)^2}{Z_s} \quad (3)$$

根据互感理论模型，一次回路等效电路如图3所示。再定义回路阻抗变量为

$$Z_{11} = R_{f1} + j\omega L_{f1} \quad (4)$$

$$Z_{22} = R_1 + j\omega L_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + Z_r \quad (5)$$

此时，图3a的等效电路可以进一步简化为图3b，根据基尔霍夫电压电流定律可以得到

$$\begin{cases} U_P = I_{f1}Z_{11} + I_1Z_{22} \\ I_{f1} = I_1 + j\omega C_{f1}Z_{22}I_1 \end{cases} \quad (6)$$

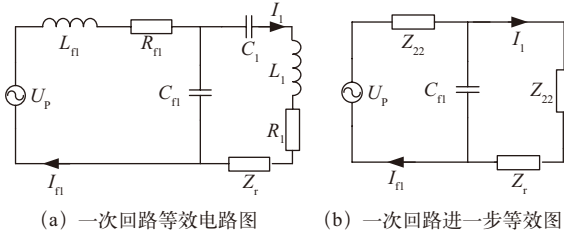


图3 一次回路等效电路图

Fig. 3 Equivalent circuit diagram of primary side circuit

联立式(1)~式(6)，可以求解得到补偿回路和一次回路电流值为

$$I_{f1} = (1 + j\omega C_1 Z_{22})I_1 \quad (7)$$

$$I_1 = \frac{U_P}{Z_{11} + Z_{22} + j\omega C_1 Z_{11} Z_{22}} \quad (8)$$

忽略寄生电阻参数，对式(8)进行化简可以得到一次线圈电流和输出电压为

$$I_1 \approx \frac{U_P}{j\omega L_f} \quad (9)$$

$$U_{RL} \approx \frac{M}{L_f} U_P \quad (10)$$

可以看出，LCC-S高阶补偿拓扑的一次线圈电流和输出增益受补偿电感 L_f 控制。相较于SS拓扑，LCC-S高价补偿拓扑在低耦合系数下一次线圈电流过大且增益不可调整，具有更好的性能优势。

1.2 Buck-Boost电路原理图

如图4所示，为了解决因接收线圈和发射线圈的位置偏差、输入电压波动等因素引起的WPT输出电压波动问题，通常在WPT的输出端串联降压-升压DC/DC变换器。降压-升压变换器有很多类型，包括半桥型、全桥型和反激型等。由于电路需要在环境恶劣的输电线路附近工作，有必要选择结构最简单、元件少和控制简单的电路拓扑。

为了尽可能延长监控设备的寿命，有必要确保电源电压的稳定性，而一个优秀的控制器是必

不可少的。MPC的性能优于传统的比例积分微分(PID)控制，当负载或者输入电压发生变化时，该控制方法既可以及时调整和跟踪参考值，又可以保证输出电压的恒定，而且这种闭环控制方法没有太多的参数需要调试，降低了设计的复杂度，能够满足输电线路监测装置的需求。

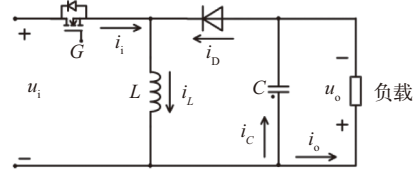


图4 降压-升压电路拓扑结构示意图

Fig. 4 Schematic diagram of buck-boost circuit topology

2 MPC模型建立

占空比定义为开关管的导通时间与一段时间内的时间之比。为了输出所需的电压，降压-升压变换器通常采用脉宽调制(Pulse Width Modulation, PWM)。无论PWM控制是基于传统的PID算法还是基于MPC算法，输出电压都是通过改变占空比值来调节的。如图5所示，通过改变占空比可以改变电感器中存储的能量。当开关管关断时，电感器的能量释放到电容器和负载。输出电压与电感能量的值密切相关。

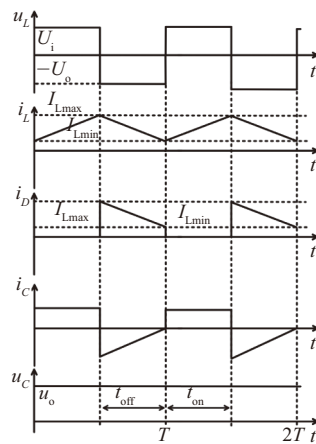


图5 降压-升压电路工作波形图

Fig. 5 The buck-boost circuit working waveform

在图5中，占空比 D 和输出电压 U_o 的关系为

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (11)$$

$$U_o = \frac{D}{1-D} U_i \quad (12)$$

当占空比 $D=0.5$ 时，输出电压等于输入电压；当占空比 $D<0.5$ 时，输出电压小于输入电压；当占空比 $D>0.5$ 时，输出电压大于输入电压。

当变换器达到稳定状态时，电容电流 i_c 在一个周期内的积分为零，电感电流 i_L 的平均值是输入电流 i_s 和输出电流 i_o 的平均值之和。可以计算出 i_L 在一段时间内的平均值为

$$I_L = \frac{1}{1-D} \frac{D}{1-D} \frac{U_i}{R} \quad (13)$$

为了建立MPC模型，首先需要建立变换器的状态方程。根据基尔霍夫定律，可以得到变换器在一个周期内的状态方程为

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_o}{dt} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ u_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \end{pmatrix} u_i, t \in [0, DT] \\ \begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{du_o}{dt} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 0 & -\frac{1}{L} \\ \frac{1}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ u_o \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} u_i, t \in [DT, T] \end{aligned} \quad (14)$$

式(14)是一个瞬态表达式，不能直接用于控制电路。有必要对方程进行改进，即建立方程的均值模型。计算一段时间内电感电流 i_L 和输出电压 u_o 的平均值，可以得到

$$\frac{d\langle u_o \rangle}{dt} = -\frac{1}{RC} \langle u_o \rangle + \frac{D}{RC(1-D)} u_i \quad (15)$$

值得注意的是，式(15)中的微分项在一定程度上反映了输出电压 u_o 的变化趋势。因此，使用欧拉正演法对式(15)进行离散化，得

$$u_o(k+1) = 1 - \frac{T}{RC} u_o(k) + \frac{T}{RC} \frac{D}{1-D} u_i(k) \quad (16)$$

式中， $u_o(k)$ 为 k 时刻的采样电压； $u_o(k+1)$ 为根据 k 时刻的采样电压和电流信息预测的 $k+1$ 时刻的输出电压。值得注意的是，在式(16)中表示的预测模型包含负载电阻 R 。实际监测设备中的电阻

可能难以测量且可变化，预测模型不能依赖于负载电阻 R 。

为了进一步改进预测模型，可以引入负载电流 i_o 实时估计负载电阻。改进的预测模型为

$$u_o(k+1) = u_o(k) \frac{T}{C} i_o(k) + \frac{T}{C} \frac{i_o(k)}{u_o(k)} \frac{D}{1-D} u_i(k) \quad (17)$$

假设变换器的输出目标电压为 U^* ，MPC的评估函数为

$$J_i(k) = (u_o(k+1) - U^*)^2 \quad (18)$$

评估函数越小，在式(18)中下一时刻的输出电压和参考电压之间的偏差就越小。因此，占空比 D 应使评估函数的值最小化，并且可以获得评估函数的导数，即

$$\begin{aligned} \frac{\partial J_i(k)}{\partial u_o(k)} &= 0 \Rightarrow D(k) = 1 - \\ &\frac{\frac{T}{C} \frac{i_o(k)}{u_o(k)} u_i(k)}{U^* + \frac{T}{C} \frac{i_o(k)}{u_o(k)} u_i(k) - \left(u_o(k) - \frac{T}{C} i_o(k) \right)} \end{aligned} \quad (19)$$

基于当前采样值，MPC可以在式(19)中直接预测系统的稳态占空比。因此，该系统在实际运用场景中具有很强的抗干扰能力和快速响应能力。

本章节给出了MPC方法的推导过程，从Buck-boost升降压电路的模型进行分析，通过对系统方程进行离散化，得到了适用于该系统的价值函数。由于输电线路监测装置工作环境较为特殊，在白天或者晚上高压输电线路上的电压经常会因为用户侧的用电状态发生改变，导致WPT系统的输入电压可能会随时间不断变化，此时传统的PID控制可能不再适用，所以有必要引入MPC。

3 仿真实证

为了验证算法的可行性，在PLECS环境中构建了仿真电路，仿真具体参数见下表，仿真电路如图6所示。

表 1 WPT 系统仿真参数
Tab. Simulation parameters of WPT system

参数	值
工作频率 /kHz	150
输入电压 /V	500
发射线圈自感 /μH	28.9/239.7
接收线圈自感 /μH	178
发射线圈互感 /μH	5
负载阻值 /Ω	10

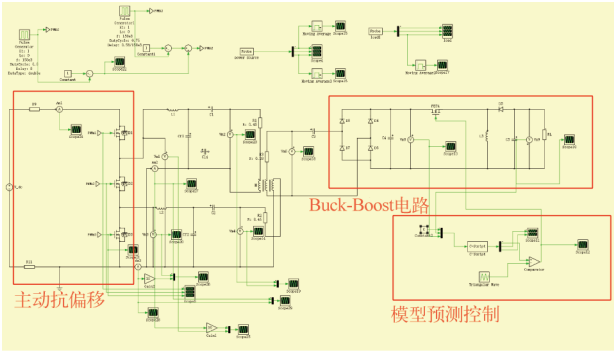


图 6 PLECS 仿真电路示意图
Fig. 6 Schematic diagram of PLECS simulation circuit

图6中，左边为H3桥逆变装置电源，由于输电线路装置的电压等级较高，采用双发射端装置可以更加灵活地控制输出电压。当输出功率要求较低时，只需给一路通道供电即可满足输出要求；当输出功率要求较高时，可以采用两路通道供电来满足输出要求。本文分析了如何保证监测设备电源电压的稳定性，而WPT的运行机制不是研究的重点。电路仿真的目的是要求系统在正常工作时，稳态期间输出电压 u_o 波动值在1%以内，电感电流波动在20%以内，降压-升压变换器的参数可以根据设计指标进行计算。

本文采用模型预测控制方法的仿真结果如图7所示，传统PI控制方法的PI参数采用以往项目经验数值，取 $K_p=0.005$ ， $K_i=3$ 。系统给定参考电压为145 V，利用升降压电路和MPC方法，可以做到输出电压的快速跟踪，并且误差限制在1%以内。此外，从图7中也可以看出，传统PI控制方法需要

10 μs左右的时间才能实现输出电压的稳定，MPC方法只需要5 μs左右的时间，相比于传统的PI控制等方法，能够降低50%左右的跟踪时间，增加系统的动态调节能力，当负载变化时，输出电压能快速保持在一个稳定的水平。

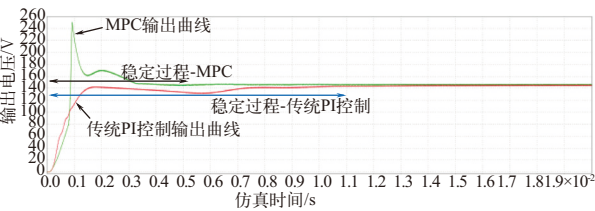


图 7 输出电压仿真波形
Fig. 7 Simulated waveform diagram of output voltage

为了进一步体现系统控制效果的鲁棒性，在仿真软件中改变负载电阻值并进行仿真，依次记录系统传输效率与输出电压的数值。

当系统负载电阻值发生改变时，系统传输效率变化情况如图8所示。由图8可以看出，当负载电阻值变大时，系统传输效率有上升的趋势，这是因为负载值变大会使得流经系统的电流变小，减少了系统的损耗。从图9可以看出，当负载发生改变时，系统输出电压依旧能够保持恒定，在参考电压值145 V附近。图8与图9可以显示出控制方法对不同阻值的负载都具有非常优良的控制效果，可以适用于具有不同元器件特性的设备。

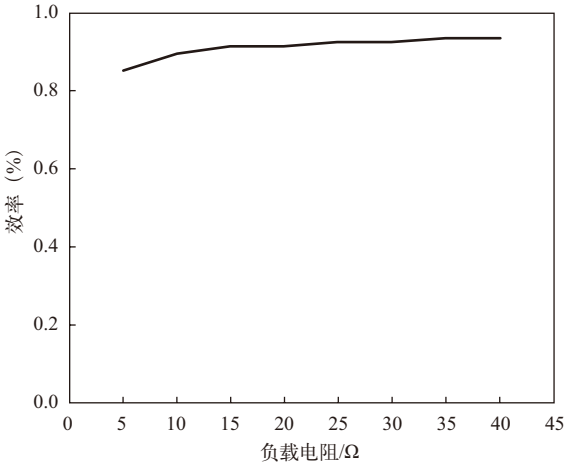


图 8 系统传输效率随负载电阻变化曲线图
Fig. 8 Curve of system transmission efficiency with load resistance variation

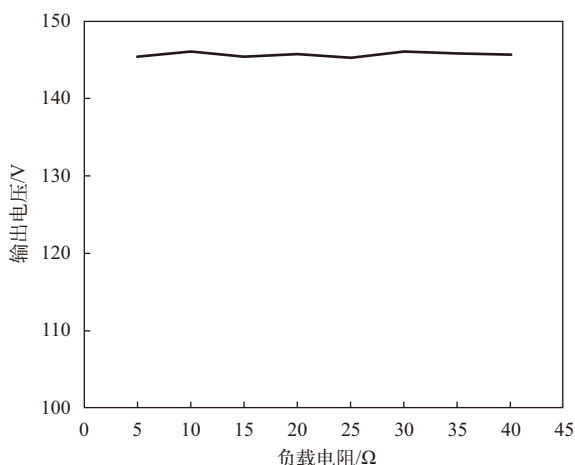


图9 输出电压随负载电阻变化曲线图

Fig. 9 Curve of output voltage with load resistance variation

4 结束语

针对架空高压输电线路监测装置WPT中电压不稳定的问题,本文提出了一种拓扑结构,其中降压-升压变换器串联在WPT的输出端,并应用MPC方法对其进行控制。在稳定性方面,采用MPC方法可以在系统输入电压或者负载发生变化时,输出电压依旧保持恒定。当电压快速变化时,输出电压只有很小的波动,在响应速度和稳定性方面优于传统的PID控制。为了继续增强系统的灵活性,提高对不同输电线路电压等级下系统的灵活调控,采用了基于H3桥逆变电路作为系统功率的输入,可以通过灵活调整通道的开通与关断来控制输出电压的大小。仿真结果表明,使用MPC方法与H3桥逆变电路的WPT系统,可以保证系统高质量的电压输出,在给定电压参考值下,输出电压的跟踪误差不超过1%,本文所提方法可以满足架空高压输电线路监测装置的用电要求。

参考文献

[1] 曾玉凤, 丘东元, 张波. 磁谐振无线电能传输系统线圈设计综述[J]. 电源学报, 2019, 17(4): 94-104.

[2] 赵争鸣, 张艺明, 陈凯楠. 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, 21.

- [3] SUN Y, LIAO Z, YE Z, et al. Determining the maximum power transfer points for MC-WPT systems with arbitrary number of coils[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9734-9743.
- [4] DAI X, LI X, LI Y, et al. Maximum efficiency tracking for wireless power transfer systems with dynamic coupling coefficient estimation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(6): 5005-5015.
- [5] LI Y, HU J, LI X, et al. Efficiency analysis and optimization control for input-parallel output-series wireless power transfer systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 1074-1085.
- [6] 卿晓东, 苏玉刚. 电场耦合无线电能传输技术综述[J]. 电工技术学报, 2021, 36(17): 3649-3663.
- [7] 赵长明, 王云石, 郭陆灯, 等. 激光无线能量传输技术的发展[J]. 激光技术, 2020, 44(5): 538-545.
- [8] HUANG K, ZHOU X. Cutting the last wires for mobile communications by microwave power transfer[J]. IEEE Communications Magazine, 2015, 53(6): 86-93.
- [9] LEUNG H F, HU A P. Modeling the contact interface of ultrasonic power transfer system based on mechanical and electrical equivalence[J]. IEEE Journal of Emerging Selected Topics in Power Electronics, 2018, 6(2): 800-811.
- [10] 张剑韬, 朱春波, 陈清泉. 应用于无尾家电的非接触式无线能量传输技术[J]. 电工技术学报, 2014, 29(9): 33-37.
- [11] LIU C, JIANG C, SONG J, et al. An effective sandwiched wireless power transfer system for charging implantable cardiac pacemaker[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, 66(5): 4108-4117.
- [12] 吴理豪, 张波. 电动汽车静态无线充电技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2020, 35(6): 1153-1165.

- [13] SHI K, TANG C, LONG H, et al. Power fluctuation suppression method for EV dynamic wireless charging system based on integrated magnetic coupler[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(1): 1118-1131.
- [14] 吴旭升, 孙盼, 杨深钦, 等. 水下无线电能传输技术及应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8): 1559-1568.
- [15] 田子建, 林越, 陈健, 等. 无线输电技术及其在矿井安全监控系统中的应用[J]. 工矿自动化, 2014, 40(7): 32-36.
- [16] WANG W, ZHU Z, WANG Q, et al. Optimisation design of realtime wireless power supply system overhead high-voltage power line[J]. IET Electric Power Applications, 2019, 13(2): 206-214.
- [17] ZHONG W, LEE C K, HUI S Y R. General analysis on the use of tesla's resonators in domino forms for wireless power transfer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(1): 261-270.
- [18] SHAN Y, HU J, LI Z, et al. A model predictive control for renewable energy based ac microgrids without any pid regulators[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9122-9126.
- [19] SPINU V, OLIVERI A, LAZAR M, et al. FPGA implementation of optimal and approximate model predictive control for a buck-boost DC-DC converter[C]. 2012 IEEE International Conference on Control Applications, Dubrovnik, 2012: 1417-1423.
- [20] LAZAR M, KEYSER R D. Non-linear predictive control of a DC-to-DC converter[C]. Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation & Motion-SPEEDAM, Capri, Italy, 2004.
- [21] PANG S, ZHANG Y, HUANGFU Y, et al. A virtual mpc-based artificial neural network controller for pmsm drives in aircraft electric propulsion system[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2024, 60(2): 3603-3612.
- [22] LIN H, CHUNG H S-H, SHEN R, et al. Enhancing stability of DC cascaded systems with CPLs using MPC combined with NI and accounting for parameter uncertainties[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(5): 5225-5238.
- [23] XIA Z, DAI X, LI Y, et al. Model predictive control of wireless power transfer system in seawater environment[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(12): 16877-16893.
- [24] CHEN S, DING W, HUO L, et al. Dynamic improvement and efficiency optimization of wireless power transfer systems using improved FCS-MPC and P&O methods[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14702-14718.
- [25] XU B, DENG J, GAN H, et al. An improved model predictive control approach for wireless power transfer system of electric vehicles[C]. 2023 2nd Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE), Chengdu, China, 2023: 693-698.

作者简介

雷翔宇（1995—），男，工程师，研究方向为电力电子。

武怡玲（1994—），女，工程师，研究方向为电力电子。

（收稿日期：2025-04-16）