

1-15-2024

Soft switching control strategy of true bipolar VSC-MTDC wind field side converter station

Wensheng LIU

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Haiyun WANG

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China, 327028229@qq.com

Xinmin HUANG

State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China

Xiangjun WANG

School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

Follow this and additional works at: <https://jepst.researchcommons.org/journal>

Recommended Citation

LIU, Wensheng; WANG, Haiyun; HUANG, Xinmin; and WANG, Xiangjun (2024) "Soft switching control strategy of true bipolar VSC-MTDC wind field side converter station," *Journal of Electric Power Science and Technology*. Vol. 38: Iss. 5, Article 9.

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.009

Available at: <https://jepst.researchcommons.org/journal/vol38/iss5/9>

This Scientific Research is brought to you for free and open access by Journal of Electric Power Science and Technology. It has been accepted for inclusion in Journal of Electric Power Science and Technology by an authorized editor of Journal of Electric Power Science and Technology. For more information, please contact dlxb04@163.com.

真双极 VSC-MTDC 风场侧换流站 软切换控制策略

刘文胜¹, 王海云¹, 黄新民², 王祥君¹

(1. 新疆大学电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2. 国网新疆电力有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830063)

摘要: 真双极多端柔性直流输电 (voltage source converter based multi-terminal direct current, VSC-MTDC) 新能源侧换流站正、负极换流器可独立控制。针对定交流电压幅值频率控制 (U/f 控制) 换流器发生故障, 将定有功无功控制 (P/Q 控制) 换流器的控制策略转换为定 U/f 控制时交直流母线电压波动较大, 严重时可能会造成新能源场站脱网这一问题, 建立统一切换控制模型, 在统一切换控制模型基础上引入基于电流跟随的软切换控制策略, 实现切换瞬间内环电流参考值同步。基于 PSCAD/EMTDC 搭建大规模新能源接入的四端真双极 VSC-MTDC 系统, 经稳态、风电场功率波动、换流器单极闭锁运行工况下的仿真, 验证了换流站对新能源接入的电压支撑和系统切换过程中电力系统平滑过渡的能力, 为进一步提高真双极 VSC-MTDC 系统控制灵活性提供了参考。

关键词: 多端柔性直流; 真双极; 换流器; 软切换

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.05.009

中图分类号: TM 723

文章编号: 1673-9140(2023)05-0087-11

Soft switching control strategy of true bipolar VSC-MTDC wind field side converter station

LIU Wensheng¹, WANG Haiyun¹, HUANG Xinmin², WANG Xiangjun¹

(1. School of Electrical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830063, China)

Abstract: True bipolar multi-terminal flexible DC transmission voltage source converter based multi-terminal direct current (VSC-MTDC) new energy side converter station positive and negative converters can be controlled independently. In view of the failure of the converter with constant AC voltage amplitude and frequency control (U/f control), the control strategy of the converter with constant active and reactive power control (P/Q control) is converted into the AC and DC bus voltage under constant U/f control in this papers. Causing the problem that the fluctuation is large and the new energy station would be disconnected from the grid in severe cases. A unified switching control model is established, and a soft switching control strategy based on current following is introduced on the basis of the unified switching control model to realize the reference value of the inner loop current at the moment of switching synchronization. Based on PSCAD/EMTDC, a four-terminal true bipolar VSC-MTDC system with large-scale new energy access is built. Through the simulation under steady state, wind

收稿日期: 2022-08-18; 修回日期: 2022-10-25

基金项目: 国家重点研发计划 (2021YFB1507005); 新疆维吾尔自治区重点研发计划 (2020B02001)

通信作者: 王海云 (1973—), 女, 硕士, 教授, 主要从事可再生能源发电与并网技术研究; E-mail: 327028229@qq.com

farm power fluctuation, and converter unipolar blocking operation, it is verified that the converter station has a voltage support of new energy access and the ability of smooth transition of the power system during the system switching process provide a reference for further improving the control flexibility of the true bipolar VSC-MTDC system.

Key words: VSC-MTDC; true bipolar; converter; soft switching

为应对全球能源危机和环境恶化问题,世界各国正在全面推进风电、太阳能发电的大规模开发和高质量发展^[1-3]。中国在《2030年前碳达峰行动方案》中提出“到2025年,非化石能源消费比重达到20%左右;到2030年,非化石能源消费比重达到25%左右,风电、太阳能发电总装机容量达到12亿千瓦以上”^[4]。然而,大规模新能源并网接入电力系统,给交直流输电技术带来了前所未有的挑战,使之难以满足多点汇集、送出可能导致的可靠性和经济性要求^[5]。真双极多端柔性直流输电(voltage source converter based multi-terminal direct current, VSC-MTDC)采用全控型电力电子器件,输电方式灵活,可以为规模性的新能源并网建立稳定的交流电压,为弱交流系统的接入提供并网条件^[6]。真双极VSC-MTDC系统可独立控制有功、无功潮流,实现多端能源互补,平衡新能源发电并网的波动性和间歇性,集中送出大规模的可再生能源^[7-9]。

目前,关于真双极VSC-MTDC系统新能源侧换流站的控制策略主要有2类。

一类是同一换流站中的正、负极换流器采用同样的控制策略,如2个独立的换流器均采用定 P/Q 控制、均采用定 U/f 控制或者均采用定 U/f 下垂控制。其中,两极均采用定 P/Q 控制无法为新能源接入提供电压支撑^[10];两极均采用定 U/f 控制在应对系统扰动时会反复调节,不利于系统稳定^[11];两极均采用定 U/f 下垂控制实现双极交流电压的稳定与功率的自动分配^[12]。

另一类是换流站中的正、负极换流器采用不同的控制策略,如正、负极换流器分别采用定 U/f 控制和定 P/Q 控制^[13]。

由于新能源机组对交流电压无支撑作用,大规模新能源并网需要相应柔性换流站建立起稳定的交流电压^[14],真双极VSC-MTDC同一换流站中的正、负极换流器需有一极采用定 U/f 控制^[15-16]。文献[17]中新能源侧换流站双极换流器均采用定 U/f 控制,此控制策略虽然能控制交流母线电压,但新

能源电场经换流站流入直流网络的功率不可控,并且双极定 U/f 控制会带来交流电压控制冲突问题,造成交流电压波动水平较大。文献[18]建立了换流站双极换流器定 U/f 控制的数学模型,得出在这种控制策略下,扰动会使控制器反复调节,不利于稳定。故在此基础上提出双极换流器定 U/f 下垂控制策略,这种控制方式的本质是引入功率控制,从而实现交流电压的稳定,但其功率精度受限。文献[19]同样也是在传统 dq 解耦控制中进行改进,其功率分配不均时会造成系统交直流电压的不稳定。文献[20]换流站内正、负极换流器采用不同的控制策略,系统运行工况不同时引入下垂控制,基于运行点优化设置系统参数提升电网运行经济性,但未说明不同工况下换流站正、负极换流器控制的具体转换流程以及交直流电压是否能保持稳定。文献[21]提出了真双极VSC-MTDC多目标协同控制,正、负极换流器也采用不同的控制策略,一极定 U/f 控制,另一极定 P/Q 控制,为交流侧提供了稳定的交流电压的同时使正、负极间功率按需分配,提升了直流电压的稳定性,但未说明新能源侧换流器单极故障进行控制策略转换时,换流器能否为新能源并网提供电压支撑的同时稳定交直流电压波动水平。

换流站内采用不同控制策略,一极换流器发生单极故障时,需要将定 P/Q 控制转换成定 U/f 控制,会造成新能源侧交直流电压波动较大,针对这一问题,提出一种软切换控制策略。首先,分析真双极VSC-MTDC系统换流站基本控制策略;然后,建立统一切换控制模型,将2种不同控制策略应用在同一内环电流控制器中;其次,将稳态时换流器双闭环部分控制变量初始化,同时在统一切换控制模型基础上引入基于电流跟随的软切换控制策略,切换瞬间将内环电流参考值同步,减小切换瞬间的冲击;最后,利用PSCAD/EMTDC搭建大规模新能源接入的真双极VSC-MTDC系统,在系统稳态、风功率波动、换流器单极闭锁下进行仿真分析,验证所提控制策略的有效性。

1 真双极 VSC-MTDC 风场侧换流站控制策略及系统结构

1.1 换流站控制器结构

大规模新能源接入的真双极 VSC-MTDC 换流站结构如图 1 所示。风电场接入交流汇集点,由换流变压器升压和正、负极换流器整流后送入直流线路。每个换流站内拥有 2 套独立的换流器,正、负极换流器在直流侧连接点接地形成回流层^[22]。

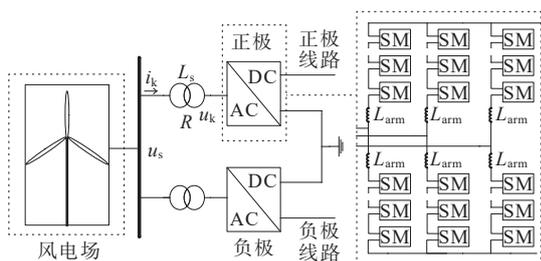


图 1 换流站结构

Figure 1 Converter station structure diagram

图 1 中, u_s 、 u_k 分别为风电场侧输出电压和换流器侧交流电压; i_k 为电网电流; L_s 、 R 、 L_{arm} 分别为变压器等效电感、电阻和换流器桥臂电感,单相等值电感为 $L = L_s + L_{arm}/2$ 。分析换流器交流侧动态特性,利用基尔霍夫定律并进行 dq 变换,同时忽略交流侧等效电阻得到如下换流器交流侧数学模型:

$$\begin{cases} L \frac{di_d}{dt} = \omega L i_q - u_d + u_{sd} \\ L \frac{di_q}{dt} = -\omega L i_d - u_q + u_{sq} \end{cases} \quad (1)$$

式中, u_{sd} 、 u_{sq} 分别为风电场侧电网电压 u_s 的 d 、 q 轴分量; u_d 、 u_q 分别为换流器侧交流电压 u_k 的 d 、 q 轴分量; i_d 、 i_q 分别为 i_k 的 d 、 q 轴分量; $\omega = 2\pi f$, $f = 50$ Hz。由式(1)可知, d 、 q 轴变量互相耦合,采用前馈解耦控制可得受控电压 u_d 、 u_q 的控制方程:

$$\begin{cases} u_d = K_{p1}(i_{dref} - i_d) + K_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt + \omega L i_q + u_{sd} \\ u_q = K_{p2}(i_{qref} - i_q) + K_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt - \omega L i_d + u_{sq} \end{cases} \quad (2)$$

式中, K_{p1} 、 K_{p2} 、 K_{i1} 、 K_{i2} 为比例积分系数; i_{dref} 、 i_{qref} 分别为 d 、 q 轴参考电流。由式(2)可得内环电流控制器结构如图 2 所示。

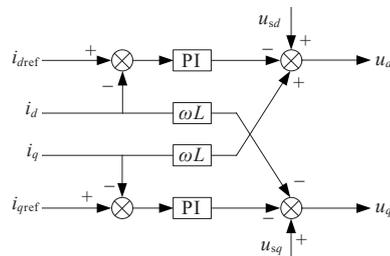


图 2 内环控制器

Figure 2 Inner loop controller

外环功率控制通过跟踪给定参考值,产生相对应的电流参考值。由 Park 变换可得出交流侧注入到换流器的 P 和 Q 。令三相平衡时交流母线电压方向为 d 轴,则 $u_{sd} = u_s$ 、 $u_{sq} = 0$,流入换流器的功率为

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} u_s i_{sd} \\ Q_s = -\frac{3}{2} u_s i_{sq} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,换流站的 P_s 和 Q_s 是解耦的,可以通过控制 i_{sd} 、 i_{sq} 来单独控制系统的 P_s 和 Q_s 。外环 P/Q 控制器结构如图 3 所示。

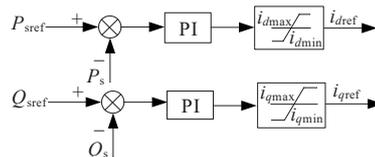


图 3 P/Q 控制器

Figure 3 P/Q controller

由于换流站的有功功率和无功功率可以独立控制,新能源并网时需要建立起稳定的交流电压,因此换流站的外环控制为定交流电压控制, U/f 控制器如图 4 所示。

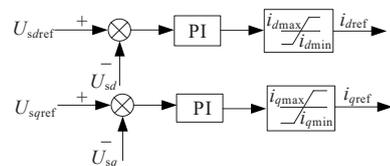


图 4 U/f 控制器

Figure 4 U/f controller

新能源侧模块化多电平换流器(modular multi-level converter, MMC)控制策略结构如图 5 所示,外环控制可选择 P/Q 和 U/f 控制,分别对应图 5 中的 n 点与 m 点,外环控制产生的 i_{dref} 、 i_{qref} 经内环电流控制、SPWM 调制、均压控制输出调制信号。

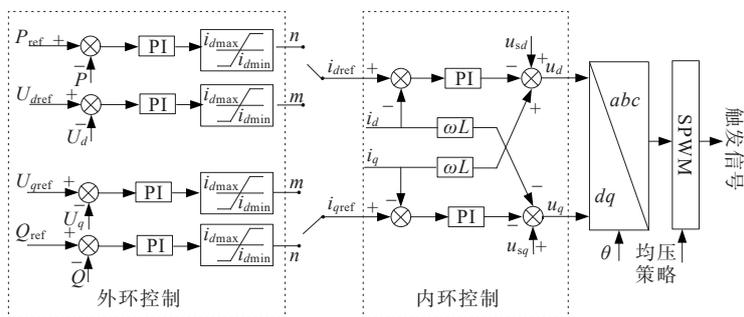


图5 MMC结构

Figure 5 MMC structure diagram

1.2 新能源侧换流站控制策略

真双极 VSC-MTDC 风场侧正负极换流器控制策略如表 1 所示,双极独立的换流器一极采用定 P/Q 控制,另一极定 U/f 控制,这种控制策略可以实现对功率传输和新能源侧交流电压的同时控制。

表 1 换流站控制策略

Table 1 Control strategy of converter station

换流器	控制策略	控制目标
正极	U/f	风电场侧交流电压
负极	P/Q	功率传输

换流站的负极采用定 P/Q 控制可独立控制换流站有功和无功功率,准确、迅速地跟踪给定功率值,主动分配两极所传输的有功功率。换流站的正极换流器采用定 U/f 控制,它能够为新能源并网提供稳定的交流电压控制能力,并作为有功功率的松

弛节点对新能源侧功率波动进行消纳。此时,正、负极换流器的传输功率分别为

$$\begin{cases} P_1 = P_s - P_2 \\ P_2 = P_{2ref} \end{cases} \quad (4)$$

式中, P_s 为新能源侧传输功率; P_1 、 P_2 为正负极传输功率; P_{2ref} 为给定功率参考值。

1.3 四端真双极 VSC-MTDC 系统

图 6 为新能源接入的四端真双极 VSC-MTDC 系统。如图 6 所示,新能源侧换流站 1 和 2 的正极采用定 U/f 控制,负极采用定 P/Q 控制,额定容量分别为 1 500、3 000 MW;交流系统换流站 3 作为调节点,正、负极换流器均采用定直流电压和无功功率控制,额定容量为 1 500 MW;交流系统换流站 4 作为受端站,正、负极均采用定有功无功控制,额定容量为 3 000 MW。风电场采用双馈风机单机聚合模型,单台输出功率为 5 MW。

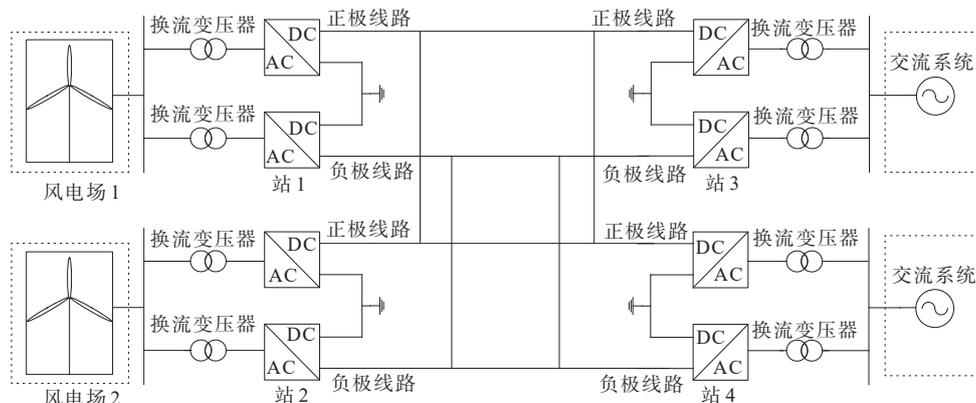


图 6 四端真双极 VSC-MTDC

Figure 6 Four-terminal true bipolar VSC-MTDC

2 新能源侧换流站软切换控制策略

软切换控制策略是指同一换流站中 2 个应用不

同控制策略的换流器因故障需要切换控制策略时,使交直流侧母线电压波动水平最小化。首先对控制模式硬切换过程进行分析,归纳控制策略硬切换造成暂态冲击的原因;然后根据控制目标的不同建

立统一切换控制模型;最后在统一切换控制模型基础上引入基于电流跟随的软切换控制策略使输出的参考电流在切换瞬间具有正确的初始值,有效地平抑切换过程中交直流电压波动水平。

2.1 控制模式硬切换过程分析

紧急硬切换过程如图 7 所示。当正极换流器发生故障而闭锁时,需要将负极换流器控制策略的定 P/Q 控制转换为定 U/f 控制,为新能源侧提供稳定的交流电压。控制策略切换过程中,正极换流器闭锁,负极换流器将承担风电场输出的全部功率,接收功率发生突然变大,换流器不能及时调节直流侧电压而造成波动;同时控制方式的切换会使控制器内部参考值发生突变,造成调制信号突变,从而引起交流母线电压波动,严重时可能会造成新能源场站脱网。如何平抑切换过程中的交直流电压波动水平,使换流站正常运行,是软切换的难点。

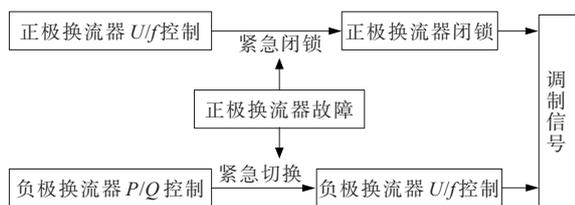


图 7 控制模式的紧急硬切换过程

Figure 7 Emergency hard switching process of control mode

2.2 统一切换控制模型的建立

外环功率控制产生内环电流参考值,内环电流经 PI 控制快速跟踪电流参考值,最终生成阀极的调制信号。不同控制模式会引起外环功率控制目标量的不同,风电场侧换流站内双极换流器控制策略采用同一个电流内环,由外环目标量引入控制系数 m 、 n 、 c ,建立统一切换数学模型:

$$mU_{ac} + nP + c = 0 \quad (5)$$

式中, U_{ac} 、 P 分别表示风电场侧交流母线电压和传输有功功率。

统一切换控制模式如表 2 所示, m 、 n 、 c 的取值决定了换流站的控制策略,选择不同的控制系数,相应控制策略就可进行切换。当 $m=0$ 、 $n=1$ 时,系统未切换,控制策略为定 P/Q 控制;当 $m=1$ 、 $n=0$ 时,控制策略切换为定 U/f 控制,外环控制参量由 P 变为 U_{ac} ,进而完成控制策略的切换。

表 2 统一切换控制模式

Table 2 Unified switching control model

m	n	c	控制策略
1	0	$-U_{ac}$	定交流电压控制
0	1	$-P$	定有功功率控制

2.3 基于电流跟随的软切换控制策略

由统一切换控制模型可知换流站控制策略是否切换,未发生切换时,在同一时刻换流器双闭环控制输出的阀极调制信号唯一,只有一种控制方式处于运行状态。双闭环矢量控制的外环仍由有功、无功功率测量值跟踪其参考值,经 PI 控制产生相对应的内环电流参考值。此时将其他控制运行方式下的交流电压参考值与测量值、内环电流的参考值与测量值初始化,不进行控制。当统一切换控制模型控制系数发生变化后,初始化参数才进行相应的计算与控制。

为了不改变系统换流器控制参数,在统一切换控制模型基础上引入基于电流跟随的软切换控制策略,将外环 P/Q 控制器得到的 $i_{\Delta P}$ 、 $i_{\Delta Q}$ 依次叠加到 U/f 控制器输出上的同时把 U/f 控制器经 PI 产生的 $i_{\Delta ud}$ 、 $i_{\Delta uq}$ 分别叠加到外环 P/Q 控制器的输出,得电流负反馈跟随方程,如下:

$$\begin{cases} i_{dref} = (i_{\Delta P} - i_{\Delta ud}) \left(K_{p1} + \frac{K_{i1}}{S} \right) \\ i_{qref} = (i_{\Delta Q} - i_{\Delta uq}) \left(K_{p2} + \frac{K_{i2}}{S} \right) \end{cases} \quad (6)$$

稳态时,定 U/f 换流器的外环控制输出内环电流的参考值 i_{dref} 、 i_{qref} , i_{dref} 、 i_{qref} 经过解耦控制得到相应电压参考值,输出信号均为稳态值。换流站内发生单极闭锁时,需要将定 P/Q 控制极转换为定 U/f 控制,控制模式切换时,将上一时刻未切换前的内环电流 i_{dref} 、 i_{qref} 赋值给切换后的内环电流参考值 i'_{dref} 、 i'_{qref} ,如下:

$$\begin{cases} i'_{dref} - i_{dref} = 0 \\ i'_{qref} - i_{qref} = 0 \end{cases} \quad (7)$$

切换瞬间内环电流的扰动为 0,然后在进行内环电流 PI 计算的同时输出相应阀极调制信号,最后可得出受控电压 u_d 、 u_q 的控制方程:

$$\begin{cases} u_d = K_{p1} (i'_{dref} - i_d) + K_{i1} \int (i'_{dref} - i_d) dt + \omega L i_q + u_{sd} \\ u_q = K_{p2} (i'_{qref} - i_q) + K_{i2} \int (i'_{qref} - i_q) dt - \omega L i_d + u_{sq} \end{cases} \quad (8)$$

控制器切换瞬间的输出值较前一状态没有发生变化,从而避免调制信号的突变,实现了将定P/Q

控制极转换为定U/f控制的软切换,基于电流跟随的软切换控制策略结构如图8所示。

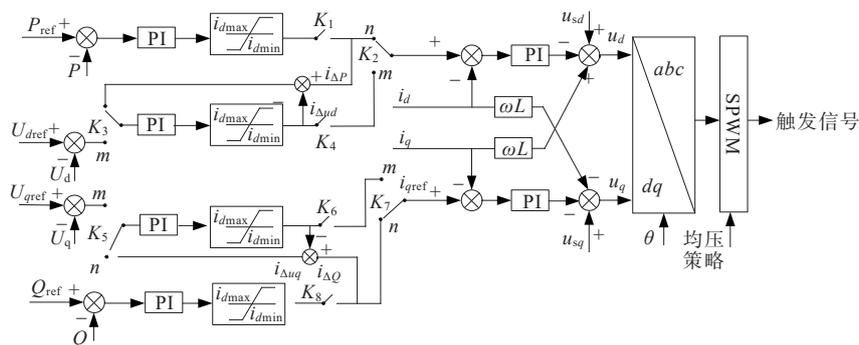


图8 软切换控制策略结构

Figure 8 Switching control strategy structure

由图8可知,未进行电流跟随控制时工作状态如下:切换前 $K_1、K_8$ 闭合, $K_4、K_6$ 断开, $K_2、K_7$ 均接在 n 点, $K_3、K_5$ 均接在 m 点;切换后 $K_4、K_6$ 闭合, $K_1、K_8$ 断开, $K_3、K_5$ 均不变, $K_2、K_7$ 均切换至 m 点。不考虑切换前换流站的内环电流参考值的状态,给定值会有一个突变,可能会引起 $i_{dref}、i_{qref}$ 与测量值存在较大误差。同时切换后的内环PI控制器需重新计算,需要一定时间调节到稳态,这个过程会给交、直流侧电压带来较大的冲击。

采用电流跟随控制时工作状态如下:切换前 $K_1、K_8$ 闭合, $K_4、K_6$ 断开, $K_2、K_3、K_5、K_7$ 均接在 n 点。此时换流器采用定P/Q控制,P、Q经PI控制器、限幅控制器产生内环控制器的输入电流 $i_{dref}、i_{qref}$,同时,其输出 $i_{dref}、i_{qref}$ 与定U/f控制外环输出做差后经PI控制器调节,此时定P/Q控制与定U/f控制的外环输出状态相同,内环PI控制器的输入完成了匹配,内环电流进行了跟随并减少了动态调节时间;切换后 $K_4、K_6$ 闭合, $K_1、K_8$ 断开, $K_2、K_7、K_3、K_5$ 均切换至 m 点。切换瞬间 $i_{dref}、i_{qref}$ 跟随切换前一时刻电流的状态,令定U/f控制的外环输出作为内环控制器的输入,使参考电流 $i_{dref}、i_{qref}$ 连续、准确,通过反馈电流跟随这一控制结构可减少直接切换造成的电压、电流等暂态冲击。切换前后换流器控制参数 $K_p、K_i$ 均未改变,保证了换流器不同工况下的运行稳定性。

为验证所提软切换控制策略的正确性,在PSCAD/EMTDC仿真软件中搭建模型进行切换仿真,得到如图9所示的控制器中 $i_{dref}、i_{qref}$ 与实际值波形。

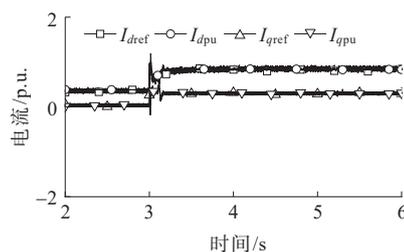


图9 参考值与实际值跟随图

Figure 9 Reference value and actual value following diagram

由图9可知,稳态时实际电流 $i_{dpu}、i_{qpu}$ 与内环电流参考值 $i_{dref}、i_{qref}$ 保持一致,控制策略切换时交流侧实际电流能快速跟踪内环电流参考值,从而减小切换过程中的参考值突然变化引起的冲击。软切换流程如图10所示。

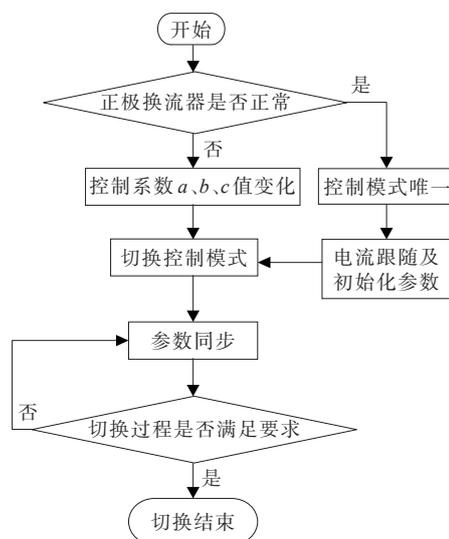


图10 软切换流程

Figure 10 Soft switching flow chart

3 仿真分析

3.1 仿真模型和参数

基于 PSCAD/EMTDC 仿真软件,搭建了如图 6 所示的新能源接入的四端真双极 VSC-MTDC 系统。其中风电场 1 和换流站 1 主要参数如表 3 所示。

表 3 系统参数

Table 3 System parameter

系统	参数	单位	数值
风电场 1	机端额定电压	kV	0.69
	风电场额定功率	MW	1 500
	交流母线额定线电压	kV	525
	额定功率	MW	1 500
换流站 1	换流变压器额定容量	MV·A	1 700×2
	桥臂电抗器	mH	40
	直流侧额定电压	kV	±500
	直流电抗器	mH	200
	U/f 换流器 $K_{p1}, K_{p2}, K_{i1}, K_{i2}$		10, 10, 0.030 3, 0.030 3
P/Q 换流器 $K_{p1}, K_{p2}, K_{i1}, K_{i2}$		4, 2, 0.030 3, 0.030 3	

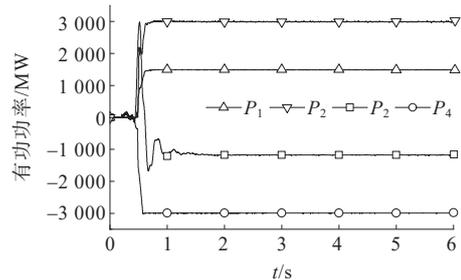
针对风场侧换流站正、负极换流器采用不同控制策略时,分别在系统稳态、风电场功率波动以及换流器闭锁 3 种场景下开展仿真分析,以系统稳态、风电场功率波动验证风场侧换流站正、负极换流器采用不同控制策略能为新能源并网提供稳定电压控制能力的同时消纳风电场出力波动的情况;以单极换流器闭锁验证所提软切换控制策略平抑切换时交直流侧电压波动水平的有效性。

3.2 系统稳态仿真分析

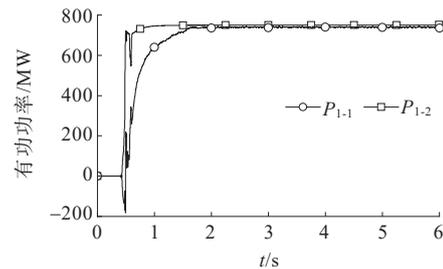
四端真双极 VSC-MTDC 正常运行时的波形如图 11 所示。其中, P_1, P_2, P_3, P_4 分别为风电场 1、2 和交流系统的有功功率。 P_{1-1}, P_{1-2} 分别为换流站正、负极的传输有功功率。 V_{Edc1}, V_{Edc2} 为换流站 1 直流正、负极电压, V_{rms} 为换流站 1 侧交流电压有效值。

由图 11 可知,四端真双极 VSC-MTDC 功率平衡,直流侧电压维持 ± 500 kV,系统正常运行。风电场侧换流站正、负极换流器分别采用定 U/f 、定 P/Q 控制,负极换流器有功功率参考值为 750 MW,实际传输功率为 750 MW,由于风电场额定功率

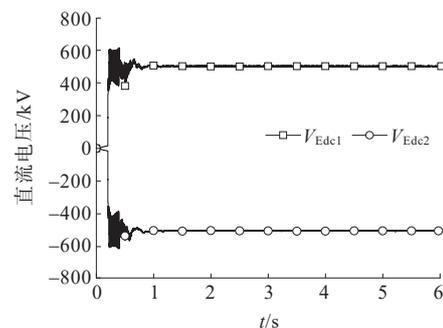
1 500 MW,正极换流器的定 U/f 控制极无法控制传输的有功功率,被动接受风电场剩余功率,正极换流器的定 U/f 控制可实现交流侧电压稳定,交流电压有效值为 525 kV。综上可知,换流站内两极换流器采用不同控制策略可实现换流站 P 和 Q 的独立控制,准确、迅速地跟踪给定功率值,主动分配两极所传输的有功功率。同时,换流站的正极采用定 U/f 控制能够为新能源并网提供稳定的交流电压控制能力。



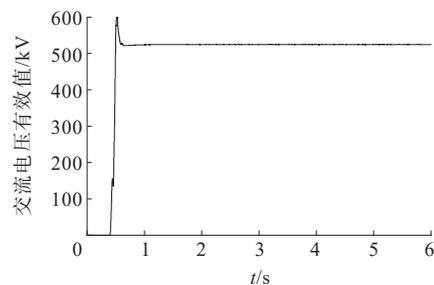
(a) 各换流站功率传输值



(b) 风电场 1 功率传输值



(c) 正负极直流电压值



(d) 换流站 1 交流电压有效值

图 11 稳态仿真波形

Figure 11 Steady-state waveform

3.3 风电场出力波动仿真分析

风电场1初始额定功率为1 000 MW。其中换流站1负极换流器功率参考值为500 MW,正极换流器承担风电场发出的剩余功率。在2.5 s时,风电场1输出功率逐渐上升,在3.5 s输出功率上升至1 250 MW,风电场2输出功率不变,仿真波形如图12所示。

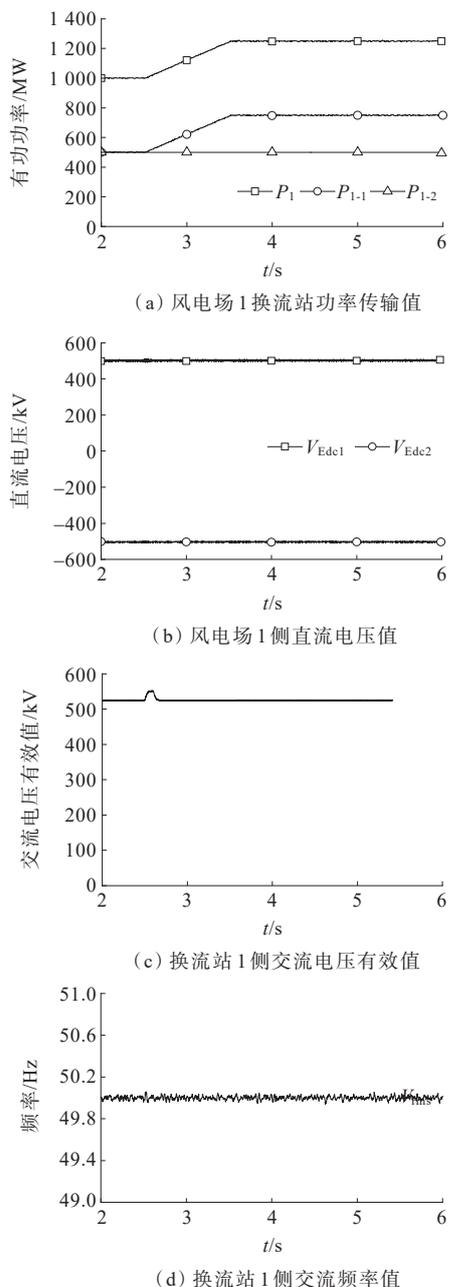


图12 功率波动仿真波形

Figure 12 Power fluctuation waveform

由图12可知,当风电场侧功率在2.5 s发生变化时,负极换流器有功参考值不变,始终传输功率500 MW,风电场的出力波动全部由正极换流器承担,风电场功率波动在正极换流器容量范围内时,

正极换流器在2.5 s功率突然增加时引起交流测电压略微升高,但很快就维持在额定电压525 kV不变,交流系统频率始终维持在50 Hz。同时交流系统换流站3作为调节站,正、负极均采用定直流电压和无功功率控制,直流正、负极电压基本不变,维持在 ± 500 kV。综上可知,采用定 U/f 控制的正极换流器可消纳风电场功率波动的同时快速稳定交流侧电压,使电压波动水平变得很小。

3.4 换流站单极闭锁仿真分析

稳态运行时风电场1输入的额定有功功率为1 500 MW,负极换流器有功功率参考值为750 MW,正极换流器在3 s因故障发生单极闭锁,此时为了给风电场提供可靠的并网电压,需将负极定 P/Q 控制转换为定 U/f 控制,紧急切换会使交直流电压波动,将提出的软切换控制策略应用于切换过程,降低电压波动水平,并与传统的直接切换进行对比分析,切换对比波形如图13所示,其中 P'_w 分别为使用软切换时风场内部单台风机输出功率; P'_{1-1} 和 P'_{1-2} 分别为使用软切换时换流站正、负极的传输有功功率; V'_{Edc1} 和 V'_{Edc2} 为使用软切换时换流站1直流正、负极电压; I'_{rms} 、 V'_{rms} 为使用软切换时换流站1侧交流电流和电压有效值。

由图13仿真波形可知,切换控制策略时,单台风机功率波动较大,正极换流器传输功率变为0 MW,负极换流器承担风电场发出的所有功率,接收的功率波动较大。直流侧电压波动较大,最大可达1.2倍的额定直流电压,超出直流线路的承压能力。交流侧电流有效值有较大冲击,最高可达1.7 kA,交流侧电压有效值最大达到750 kV,风电场存在脱网的风险。采用软切换控制策略时,切换时单台风机输出功率快速恢复到额定值,负极换流器接收功率较为平稳,直流电压波动幅度最大不超过额定直流电压的1.1倍,交流侧电流、电压有效值最大分别1.58 kA、555 kV,电流、电压恢复时间更短。具体量化对比如表4所示。

综上可知,基于电流跟随的软切换控制策略能在切换的瞬间使交流侧实际电流快速跟踪内环电流参考值,缩短动态调节时间,从而大幅度降低了交直流侧电压波动水平,切换过程对风电场的扰动较小,实现了系统的快速、平滑过渡。

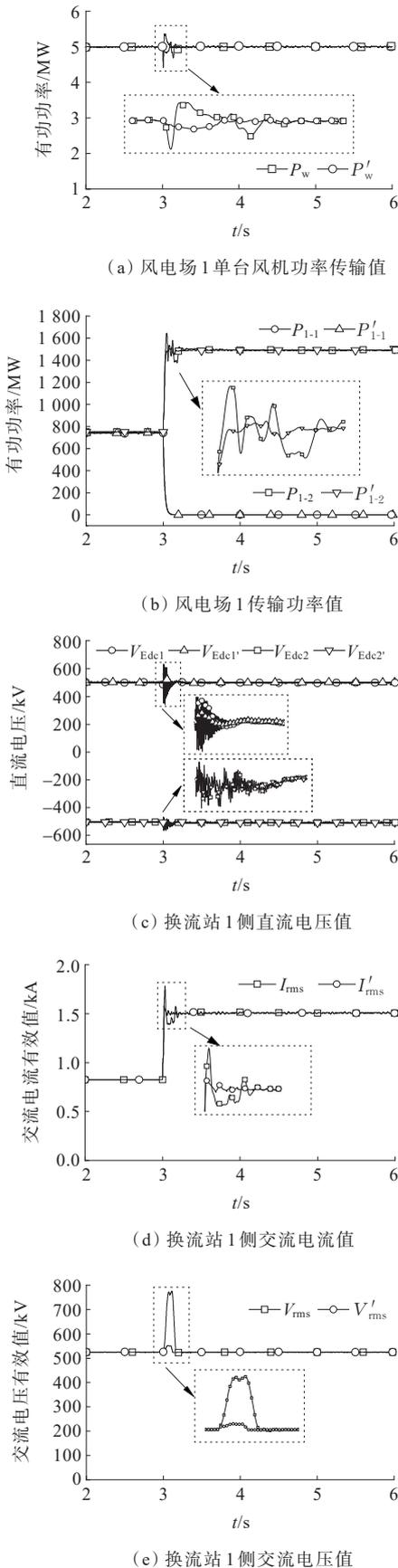


图 13 切换对比波形

Figure 13 Switching comparison waveform

表 4 效果对比

Table 4 Effect comparison

策略	功率最大波动幅度/ p.u.	直流电压波动幅度/ p.u.	交流电流、电 压最大波动 幅度/p.u.	交流电流、 电压恢复 时间/s
软切换	1.009	1.08	0.05、1.06	0.104、0.120
直接切换	1.090	1.26	0.13、1.47	0.230、0.260

4 结语

针对真双极 VSC-MTDC 系统换流站正、负极换流器采用不同控制策略进行研究,实现了新能源侧交流电压和功率传输的同时控制。同时,提出软切换控制策略解决换流站因故障需要进行控制策略切换而造成的交直流电压波动水平较大这一问题。PSCAD/EMTDC 中的仿真表明:

- 1) 真双极 VSC-MTDC 风场侧换流站正、负极换流器采用不同控制策略时,系统可以正常运行;
- 2) 风电场功率波动时,定 U/f 控制极可作为有功功率的松弛节点,对新能源侧功率波动进行消纳的同时稳定交流侧电压;

3) 换流器因故障而闭锁时,所提出的软切换控制策略可有效减小交直流侧电压波动水平,使系统平滑过渡。

VSC-MTDC 为大规模新能源并网输电提供了条件,其控制策略的研究变得尤为重要,所提出的软切换控制策略仅解决了换流器闭锁这一工况,下一步可研究多种运行工况下换流站的协调控制,通过实时更改参考值使真双极 VSC-MTDC 系统更加灵活。

参考文献:

[1] 张尧翔,刘文颖,庞清仑,等.高比例风电接入系统光热发电—火电旋转备用优化方法[J].电工技术学报,2022,37(21):5478-5489.

ZHANG Yaoxiang, LIU Wenying, PANG Qinglun, et al. Optimal power spinning reserve method of concentrating solar power and thermal power for high-proportion wind power system[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society,2022,37(21):5478-5489.
- [2] 张军六,李佳朋,唐震,等.基于本地测量的高比例新能源电力系统不平衡功率估算与附加功率控制策略[J].电力科学与技术学报,2022,37(3):50-60.
ZHANG Junliu, LI Jiapeng, TANG Zhen, et al. Local measurement based unbalanced active power estimation and supplementary power modulation for power systems with high proportions of renewable energy[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2022,37(3):50-60.
- [3] 韩笑,刘建婷,张益伟,等.柔性直流配网继电保护关键技术评述[J].电测与仪表,2022,59(3):1-9.
HAN Xiao, LIU Jianting, ZHANG Yiwei, et al. Summary of key technology of relay protection in flexible DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2022,59(3):1-9.
- [4] 张宏霞,张衍杰,马茜,等.“双碳”目标下新能源产业发展趋势[J].储能科学与技术,2022,11(5):1677-1678.
ZHANG Hongxia, ZHANG Yanjie, MA Qian, et al. Development trend of new energy industry under the goal of "double carbon"[J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(5):1677-1678.
- [5] 刘晓明,谭祖颢,袁振华,等.柔性直流接入海上风电并网选址综合优化[J].发电技术,2022,43(6):892-900.
LIU Xiaoming, TAN Zukuang, YUAN Zhenhua, et al. Comprehensive optimization of access point selection for offshore wind farm integrated with voltage source converter high voltage direct current[J]. Power Generation Technology,2022,43(6):892-900.
- [6] 徐柯,刘一民,郑少明,等.环状柔直工程直流极闭锁判据及措施量计算方法[J].电力工程技术,2022,41(1):101-107.
XU Ke, LIU Yimin, ZHENG Shaoming, et al. DC blocking criterion and measure calculation method for VSC-HVDC grid of ring structure[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(1):101-107.
- [7] 李国庆,徐亚男,江守其,等.海上风电经柔性直流联网系统受端交流故障穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):111-119.
LI Guoqing, XU Yanan, JIANG Shouqi, et al. Coordinated control strategy for receiving-end AC fault ride-through of an MMC-HVDC connecting offshore wind power[J]. Power System Protection and Control,2022,50(7):111-119.
- [8] 张建文,周剑桥,施刚,等.基于环流注入控制的MMC型固态变压器低压直流真双极运行方案[J].中国电机工程学报,2021,41(7):2350-2363.
ZHANG Jianwen, ZHOU Jianqiao, SHI Gang, et al. Operation and control of MMC-type solid state transformer with bipolar LVDC port based on active circulating current injection[J]. Proceedings of the CSEE, 2021,41(7):2350-2363.
- [9] 谢仲润,邹贵彬,杜肖功,等.基于真双极的MTDC电网直流线路快速保护[J].中国电机工程学报,2020,40(6):1906-1915.
XIE Zhongrun, ZOU Guibin, DU Xiaogong, et al. Fast DC lines protection for symmetrical bipolar based MTDC grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(6):1906-1915.
- [10] 班国邦,张腊华,袁旭峰,等.基于B2B-MMC的柔性互联变电站优化调度方法[J].智慧电力,2022,50(3):65-71.
BAN Guobang, ZHANG Lahua, YUAN Xufeng, et al. Optimal dispatching method of flexible interconnected substation based on B2B-MMC[J]. Smart Power, 2022, 50 (3):65-71.
- [11] 曹帅,向往,林卫星,等.含风电的真双极混合型MMC-MTDC系统故障穿越及能量耗散控制[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):39-48.
CAO Shuai, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Fault ride-through and energy dissipation control of bipolar hybrid MMC-MTDC integrating wind farms[J]. Power System Protection and Control,2019,47(7):39-48.
- [12] 刘泽洪,郭贤珊.含新能源接入的双极柔性直流电网运行特性研究与工程实践[J].电网技术,2020,44(9):3595-3603.
LIU Zehong, GUO Xianshan. Operating characteristics research and engineering application of voltage source converter based DC Grid with renewable source connected [J]. Power System Technology, 2020,44(9):3595-3603.
- [13] 袁志昌,郭佩乾,刘国伟,等.新能源经柔性直流接入电网的控制与保护综述[J].高电压技术,2020,46(5):1460-1475.
YUAN Zhichang, GUO Peiqian, LIU Guowei, et al. Review on control and protection for renewable energy integration through VSC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020,46 (5):1460-1475.
- [14] 杨定乾,丁杨.换流器换相脉冲相位分布的仿真及实测分析[J].高压电器,2022,58(10):211-220.
YANG Dingqian, DING Yang. Simulation and actual measurement analysis on phase distribution of commutation pulses of converter[J]. High Voltage Apparatus, 2022,58(10):211-220.
- [15] 李国庆,张林,江守其,等.风电经双极混合型MMC-HVDC并网的直流故障穿越协调控制策略[J].电力系统保护与控制,2021,49(10):27-36.

- LI Guoqing,ZHANG Lin,JIANG Shouqi,et al.Coordinated control strategies for DC fault ride-through of wind power integration via bipolar hybrid MMC-HVDC overhead lines [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 27-36.
- [16] 刘峰,舒恺,钱凯,等.直流微网 DC/DC 变换器的虚拟直流电机控制策略研究[J].电网与清洁能源,2022,38(1): 31-39+45.
- LIU Feng,SHU Kai,QIAN Kai,et al.Research on control strategy of virtual DC machines for DC/DC converter in DC microgrid[J].Power System and Clean Energy,2022,38 (1):31-39+45.
- [17] YE Y D,QIAO Y,XIE L,et al.A comprehensive power flow approach for multi-terminal VSC-HVDC system considering cross-regional primary frequency responses[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy,2020, 8(2):238-248.
- [18] 李世群,徐峰,袁森,等.柔性直流换流站备自投误动分析及优化[J].供用电,2021,38(9):89-95.
- LI Shiqun, XU Feng, YUAN Miao, et al. Analysis and optimization of standby automatic switching maloperation in flexible DC converter station[J]. Distribution & Utilization,2021,38(9):89-95.
- [19] 胡兆庆,董云龙,王佳成,等.高压柔性直流电网多端控制系统架构和控制策略[J].全球能源互联网,2018,1(4): 461-470.
- HU Zhaoqing, DONG Yunlong, WANG Jiacheng, et al. Flexible DC grid multi-terminal control and protection system framework and control strategy[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2018,1(4):461-470.
- [20] LI B T,LIU Y C,LI B,et al.Research on the coordinated control of the true bipolar VSC-HVdc grid based on operating point optimization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2018,66(9):6692-6702.
- [21] 李奇南,夏勇军,张晓林,等.渝鄂柔性直流输电系统中高频振荡影响因素及抑制策略[J].中国电力,2022,55 (7):11-21.
- LI Qinan,XIA Yongjun,ZHANG Xiaolin,et al.Key factors of medium-high frequency oscillation in chongqing-hubei HVDC system and suppression strategies[J]. Electric Power,2022,55(7):11-21.
- [22] 宁家兴,和敬涵,李猛,等.真双极柔性直流系统单极接地故障熄弧时刻识别策略[J].电力系统自动化,2022,46 (13):121-129.
- NING Jiaying, HE Jinghan, LI Meng, et al. Identification strategy for arc extinction time of single-pole grounding fault in true bipolar flexible DC system[J]. Automation of Electric Power Systems,2022,46(13):121-129.

(上接第 64 页 Continued from page 64)

- [19] 刘媛媛.磁耦合谐振式无线电能传输系统最大效率跟踪研究[D].无锡:江南大学,2022.
- LIU Yuanyuan.Research on maximum efficiency tracking in magnetic coupling resonant wireless power transfer systems[D].Wuxi:Jiangnan University,2022.
- [20] 吴振军,冯凯,窦智峰,等.磁场耦合谐振式无线电能传输补偿拓扑结构效率特性分析[J].轻工学报,2021,36(2):83-91.
- WU Zhenjun, FENG Kai, DOU Zhifeng, et al. Analysis of efficiency characteristics of compensation topology structure in magnetic coupled resonance wireless power transfer[J].Journal of Light Industry,2021,36(2):83-91.
- [21] 莫云杰,罗文广,谢广明.具有较高谐振电路品质因数的磁耦合谐振式无线电能传输系统研制[J].广西科技大学学报,2018,29(2):56-62.
- MO Yunjie, LUO Wenguang, XIE Guangming. The development of a wireless power transfer system via strongly coupled magnetic resonances with high resonance circuit quality factors[J]. Journal of Guangxi University of Science and Technology,2018,29(2):56-62.
- [22] THOEN B, STEVENS N. Shift of the optimized quality factor frequency for inductive wireless power applications [C]//2014 International Symposium on Electromagnetic Compatibility,Gothenburg,Sweden,2014:40-43.
- [23] WOJDA R P,KAZIMIERCZUK M K. Winding resistance of litz-wire and multi-strand inductors[J]. IET Power Electronics,2012,5(2):257.
- [24] ALI N,LIU Z Z,HOU Y J,et al.LCC-S based discrete fast terminal sliding mode controller for efficient charging through wireless power transfer[J]. Energies, 2020, 13(6): 1370.
- [25] LI S Q,MI C C.Wireless power transfer for electric vehicle applications[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics,2015,3(1):4-17.
- [26] GENG Y Y, LI B, YANG Z P, et al. A high efficiency charging strategy for a supercapacitor using a wireless power transfer system based on inductor/capacitor/capacitor(LCC) compensation topology[J]. Energies, 2017, 10(1):135.