

基于功率前馈补偿的三相整流器功率因数动态匹配控制策略研究

何玮栋¹,程焱²,王庆风²,许烈¹,周一鸣¹

(1.清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084;

2.航空工业陕西航空电气有限责任公司,陕西 西安 713100)

摘要:小容量电容整流器具有低成本、高功率密度、体积小等优点,在航空航天、船舶等场合应用潜力显著。但小容量电容直流电压支撑能力弱,负载突变时易引发直流母线电压大幅波动。以小电容整流器发电系统为研究对象,基于瞬时功率守恒原理分析直流电压波动抑制机理,结合发电机功率因数运行特性,在电压-电流双闭环矢量控制基础上,提出一种基于发电机功率因数动态匹配的功率前馈补偿控制策略,以抑制三相整流器负载投切引起的直流电压波动。通过实验对所提出的控制策略进行验证,结果表明,所提策略可有效抑制负载突变导致的直流母线电压波动,明显提升系统动态响应速度。

关键词:三相整流器;直流电压波动抑制;功率因数分析;功率前馈补偿

中图分类号:TM92 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd26830

Power Factor Dynamic Matching Control for Three-phase Rectifier with Power Feedforward Compensation

HE Weidong¹, CHENG Yan², WANG Qingfeng², XU Lie¹, ZHOU Yiming¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. AVIC Shaanxi Aero Electric Company Limited, Xi'an 713100, Shaanxi, China)

Abstract: Rectifiers with small DC-link capacitors feature the advantages of low cost, high power density, and small volume, showing significant application potential in aerospace, marine engineering, and other fields. However, small DC-link capacitors provide weak DC voltage support, and sudden load changes can easily induce large fluctuations in the DC-bus voltage. A small-capacitor rectifier power generation system was investigated. Based on the instantaneous power conservation principle, the suppression mechanism of DC-bus voltage fluctuations was analyzed. Combined with the power factor operation characteristics of the generator, a power feedforward compensation control strategy based on dynamic matching of the generator power factor was proposed based on the voltage-current dual-loop vector control, so as to suppress DC-bus voltage fluctuations caused by load switching of three-phase rectifiers. The proposed control strategy was validated through experiments. The results demonstrate that the proposed control strategy can effectively suppress DC-bus voltage fluctuations caused by sudden load changes, and significantly improve the dynamic response speed of the system.

Key words: three-phase rectifier; DC voltage ripple suppression; power factor analysis; power feedforward compensation

发电机整流器输出直流侧采用电容作为储能支撑环节,如果能够使发电机整流器输出功率进行实时调整,则可以实现发电机输出功率与负载功率平衡,当直流母线负载发生突变时,通过电容充放电能够实现对直流母线电压支撑作用。减小直流电压波动的一个方法是增大直流电容

容量,但大容量直流电容体积庞大,价格昂贵,同时也会带来其他负面影响,如整流桥电路桥臂短路时故障的危害程度增大等^[1]。

目前对直流母线波动抑制策略的研究多集中在功率平衡策略研究。文献[2]提出基于负载电流前馈控制方法,抑制电压突变。文献[3]基于

基金项目:陕西航空电气有限责任公司技术开发项目(JSJST2509010022)

作者简介:何玮栋(1998—),男,博士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动,Email:hewd24@mails.tsinghua.edu.cn

双PWM调速系统,设计了直流母线电压前馈补偿、 d 轴电流前馈补偿环节提高系统稳定性和带载能力。文献[4]基于推进系统反馈功率的大小、直流母线电压、推进电机电流方向以及电容的电压设计混合储能系统的控制策略,其本质仍是控制系统瞬态功率平衡。文献[5]基于背靠背双PWM换流系统,根据瞬时有功功率平衡关系,提出了一种功率前馈的抑制直流母线电压波动控制方法,没有考虑电机凸极效应以及功率因数带来的影响。文献[6]基于模块化多电平变换器,提出一种引入功率前馈抑制直流电压波动的控制策略。文献[7]基于三相整流器,设计了基于电容充放电功率的前馈通路,抑制直流母线电压波动。文献[8]基于三相整流器,设计了一种自抗扰控制与无差拍预测控制级联的综合控制策略抑制直流母线电压波动,控制算法较为复杂。

上述发电机整流器采用传统的电压-电流双闭环控制策略^[9],系统直流母线侧多余的能量将由电容吸收,当直流侧能量不足时将通过电容放电作为能量支撑,然而当电容容值较小时,其在负载投切时,电容不足以支撑直流母线电压,将会导致直流母线电压发生较大波动^[10],且调整时间较长,将导致功率器件承压升高、发热加剧,甚至过大的电压尖峰将导致功率器件击穿。本文基于小容量电容整流器控制策略,提出一种考虑电机实际功率因数的功率前馈补偿控制策略,在投切负载时对直流母线电压波动进行抑制。

1 直流电压波动分析

本文基于发电机带小容量电容整流器系统,对直流母线电压波动抑制策略进行研究,图1为本文所研究小容量电容整流器系统架构。

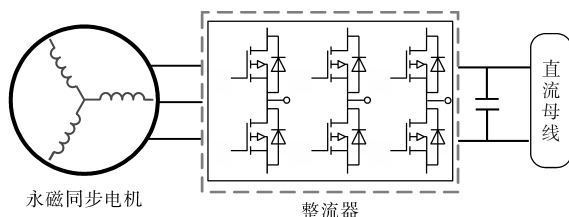


图1 发电机整流器电气结构图

Fig.1 Electrical structure diagram of generator rectifier

在忽略整流器功率器件损耗、整流器热损耗的影响后,对发电机整流器功率流动进行分析,发电机经过整流器输出至直流负载侧的功率流动^[11]如图2所示。

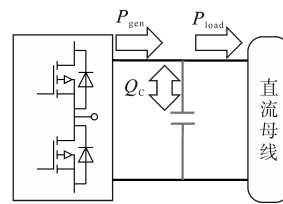


图2 发电机整流器能流图

Fig.2 Energy flow diagram of generator rectifier

发电机整流器输出有功功率,一部分提供给负载,另一部分通过直流支撑电容充放电进行功率平衡。当假定直流侧负载为阻性负载时,其直流输出功率可视为纯有功分量,得到如下式所示的直流负载输出功率 P_{load} :

$$P_{load} = U_{dc} \cdot I_{dc} \quad (1)$$

式中: U_{dc} 为直流电压; I_{dc} 为直流电流。

发电机输出功率 P_{gen} 如下式所示:

$$P_{gen} = \sqrt{3} \cdot U_{line} \cdot I_{line} \cdot \cos\varphi \quad (2)$$

式中: U_{line} 为电机定子线电压; I_{line} 为电机定子线电流; $\cos\varphi$ 为电机功率因数。

电容只有在直流电压波动时才会进行充放电,其充放电功率 Q_c 可由下式得到:

$$Q_c = U_{dc} \cdot i_c = C \frac{dU_{dc}}{dt} \cdot U_{dc} \quad (3)$$

式中: C 为电容容值。

根据瞬时功率守恒可得下式:

$$P_{gen} = P_{load} \pm Q_c \quad (4)$$

将式(2)和式(3)代入式(4)中,推导直流电压变化率如下式所示:

$$\frac{dU_{dc}}{dt} = \pm \frac{\sqrt{3} \cdot U_{line} \cdot I_{line} \cdot \cos\varphi - U_{dc} \cdot I_{dc}}{C \cdot U_{dc}} \quad (5)$$

由式(5)可知,影响直流母线电压波动幅值因素之一是电容容值,通过增大直流电容容量能够减小直流母线电压波动,但是电容重量的增加将会导致整流器功率密度下降,且电容容量越大,体积越大,使系统安装不便^[12]。另一个影响直流母线电压波动幅值的因素是功率平衡,通过式(5)分子可得:当发电机整流器输出功率不等于直流负载功率时,将导致直流母线电压产生较大波动。

在稳态情况下,直流母线电压维持不变,此时认为发电机发出功率全部用于直流侧负载功率,当直流侧负载发生突变时,直流母线输出由于控制环工作,其发电机瞬时输出功率不能及时跟踪直流母线侧负载功率,导致电容充放电,进而导致直流母线电压发生波动。因此,在控制逻

辑中缩短发电机整流器输出功率调整时间,能够减少直流电压波动。

2 永磁同步电机功率因数分析

永磁同步电机在发电运行时输出三相交流电,经过整流器变换输出直流电压供负载使用。永磁同步电机功率因数与其内部磁场建立有关,其输出交流电压与交流电流之间存在功率因数角^[13],按照转子磁场定向矢量控制,将旋转坐标系 d 轴定位到转子磁链上^[14],此时电压相位与电流相位如图3所示。

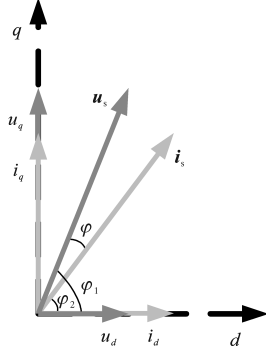


图3 发电机定子输出电压与电流相位图

Fig.3 Generator stator output voltage and current phase diagram

在 d - q 坐标系下电机定子电压 u_d 和 u_q 方程如下式所示:

$$\begin{cases} u_d = R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q \\ u_q = R \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_e \cdot L_d \cdot i_d + \omega_e \cdot \Psi_f \end{cases} \quad (6)$$

式中: L_d 为电机 d 轴电感; L_q 为电机 q 轴电感; ω_e 为电机电角速度; Ψ_f 为电机永磁体磁链。

由电压矢量图可得电压角度 φ_1 计算值如下式所示:

$$\begin{cases} \cos \varphi_1 = \frac{u_d}{u_s} = \frac{R \cdot i_d + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} - \omega_e \cdot L_q \cdot i_q}{\sqrt{u_d^2 + u_q^2}} \\ \sin \varphi_1 = \frac{u_q}{u_s} = \frac{R \cdot i_q + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} + \omega_e \cdot L_d \cdot i_d + \omega_e \cdot \Psi_f}{\sqrt{u_d^2 + u_q^2}} \end{cases} \quad (7)$$

由电流矢量图可得电流角度 φ_2 计算值如下式所示:

$$\begin{cases} \cos \varphi_2 = i_d / i_s = i_d / \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \\ \sin \varphi_2 = i_q / i_s = i_q / \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \end{cases} \quad (8)$$

由此可计算电压与电流功率因数角 φ :

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \quad (9)$$

由式(9)得到发电机整流器功率因数 $\cos \varphi$:

$$\begin{aligned} \cos \varphi &= \cos(\varphi_1 - \varphi_2) \\ &= \cos \varphi_1 \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_1 \cdot \sin \varphi_2 \end{aligned} \quad (10)$$

将式(7)和式(8)代入式(10)得:

$$\cos \varphi = (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) / (u_s \cdot i_s) \quad (11)$$

将式(6)代入式(11)得到永磁同步电机功率因数详细展开表达式如下式所示:

$$\cos \varphi = \frac{R \cdot i_d^2 + R \cdot i_q^2 + L_d \cdot \frac{di_d}{dt} \cdot i_d + L_q \cdot \frac{di_q}{dt} \cdot i_q + \omega_e \cdot \Psi_f \cdot i_q}{\sqrt{u_d^2 + u_q^2} \cdot \sqrt{i_d^2 + i_q^2}} \quad (12)$$

由式(12)可知永磁同步电机输出功率因数与电机定子电流 i_d 和 i_q 以及电机参数相关。根据上述分析可得电机工作在单位功率因数区。

考虑在原动机转速维持不变时,在电压极限圆与电流极限圆围成的电机运行工作区内,绘制永磁同步电机工作在发电运行状态时的等功率因数线如图4所示。

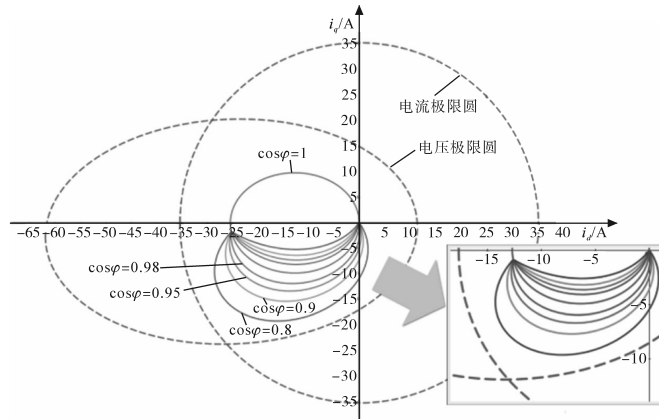


图4 永磁同步电机发电状态等功率因数线

Fig.4 Permanent magnet synchronous motor generation state equal power factor line

当直流负载发生突变时,将导致发电机输出电流产生突变,其电流突变导致发电机功率因数状态也将发生变化,不同功率因数将影响发电机输出有功功率,将导致功率匹配出现不准确的情况,因此,在考虑发电机瞬态有功功率变化的情况下,需对发电机实时功率因数进行追踪。

3 功率前馈补偿策略

基于上述分析,要实现在负载突变时,发电机输出功率调整迅速跟上直流负载功率变化,可以实现对直流电压波动的抑制,传统电压-电流双闭环PI控制动态响应时间较长,因此需要采用响应速度更快的控制策略,以抑制直流母线电压波动^[15]。通过构建负载状态前馈通道,将负载功率的变化直接反馈到电流内环控制,可大大加快系统反应时间,进而减小直流母线电压波动。

在构建负载状态前馈通道时,根据瞬时功率平衡原理,考虑将发电机输出功率与负载功率实时平衡,则理论上可以实现对直流母线电压波动的抑制。

基于上述分析,综合考虑功率因数的影响,推导得到发电机整流器输出有功功率 P_{gen} 的表达式如下:

$$\begin{cases} P_{\text{gen}} = \frac{3}{2} \cdot U_s \cdot I_s \cdot \cos\varphi \\ P_{\text{gen}} = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \end{cases} \quad (13)$$

直流负载功率 P_{load} 计算得到:

$$P_{\text{load}} = U_{\text{dc}} \cdot I_{\text{dc}} \quad (14)$$

将式(13)和式(14)进行功率平衡得到:

$$U_{\text{dc}} \cdot I_{\text{dc}} = \frac{3}{2} \cdot (u_d \cdot i_d + u_q \cdot i_q) \quad (15)$$

由式(15)计算得到 q 轴电流前馈补偿量 $i_{q\text{com}}$ 为

$$i_{q\text{com}} = \frac{\frac{2}{3} U_{\text{dc}} \cdot I_{\text{dc}} - u_d \cdot i_d}{u_q} \quad (16)$$

上述基于功率前馈补偿策略的理论推导,将功率反馈补偿映射到 q 轴电流补偿,得到 q 轴电流内环控制中电流反馈量,基于上述推导构造如图5所示功率前馈补偿策略框图。

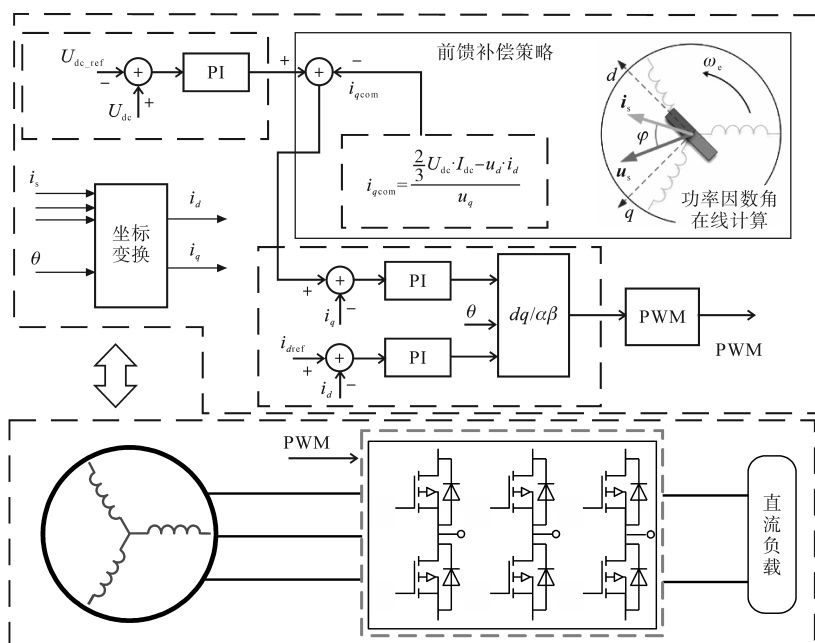


图5 基于功率前馈补偿整流器控制策略

Fig.5 Rectifier control strategy based on power feedforward compensation

上述控制策略可以在不影响整流器矢量控制算法的前提下,实现功率前馈补偿控制。

4 实验验证

为了验证所提功率前馈补偿策略对直流电压波动抑制的效果,并与单位功率因数功率前馈

补偿策略进行对比分析,使用一台三相永磁发电机带整流器带直流负载进行直流母线负载投切实验,所用三相永磁同步电机参数如表1所示。实验平台如图6所示。

设置直流母线负载投切功率为3 kW,通过电子负载箱实现对直流负载投切控制得到如图7和

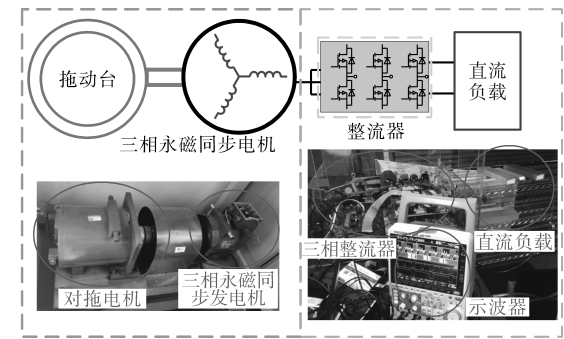


图6 实验平台

Fig.6 Experimental platform

表1 电机参数与整流器参数

Tab.1 Motor parameters and rectifier parameters

参数	数值	参数	数值
额定电动势/V	321	d 轴电感/H	0.006
额定电流/A	26	q 轴电感/H	0.013
额定频率/Hz	100	定子电阻/ Ω	0.26
额定功率/kW	15	磁链/Wb	0.31
极对数	4	额定转矩/(N·m)	60
直流母线电压/V	300	直流支撑电容/ μ F	400

图8所示的实验结果。其中 i_{DC} 为负载电流, U_{DC1} 为不加前馈算法时电压波形, U_{DC2} 为单位功率因数时功率补偿算法电压波形, U_{DC3} 为实变功率因数功率补偿算法电压波形。

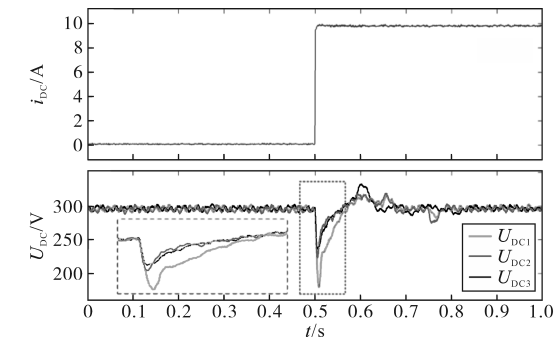


图7 负载投入时直流母线电压波动

Fig.7 DC Bus voltage fluctuations upon load input

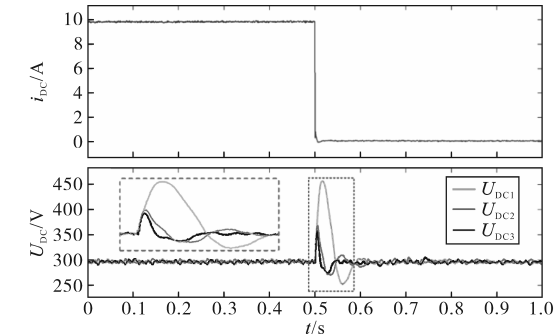


图8 负载切出时直流母线电压波动

Fig.8 DC Bus voltage fluctuations upon load output

负载投入时,无补偿策略下直流母线电压出现剧烈跌落,最大波动幅值达120 V,稳态恢复时

间约为0.18 s;单位功率因数补偿策略可将电压波动幅值抑制至80 V以内,但稳态调节时间仍需0.16 s;而本文所提变功率因数补偿策略下,电压最大波动幅值抑制至65 V以内,稳态恢复时间缩短至0.13 s以内,波动抑制效果与动态响应速度均显著提升。

负载切出时,无补偿策略下母线电压出现大幅抬升,最大波动幅值达155 V,过冲持续时间超0.082 s;单位功率因数补偿策略可将过冲幅值降至70 V,但仍存在约0.067 s的振荡过程;本文所提策略下,电压过冲幅值被抑制至60 V以内,无振荡过程,稳态调节时间小于0.06 s。

通过对小电容整流器带载投切实验相关结果分析可知,本文提出的考虑电机实际功率因数的功率前馈补偿策略,在不降低整流控制精度的前提下,可有效抑制负载投切过程中的直流母线电压波动。相较于无补偿策略,电压波动幅值降低50%左右,稳态调节时间缩短25%;与单位功率因数补偿策略相比,波动抑制效果提升15%,动态响应速度加快10%。该策略不仅控制效果更优,且算法逻辑简洁、易于工程化实现。

5 总结

本文主要针对小容值电容整流器输出直流电压波动提出一种考虑电机实际功率因数角的功率前馈补偿控制策略。通过对直流电压波动影响因素的分析,基于功率平衡原理提出考虑电机实际功率因数角的功率反馈补偿策略。

小容值电容整流器在高功率密度要求场合具有显著优势,通过控制算法抑制直流电压波动的策略正不断深入发展,有望在未来交通电气系统发电场景中得到广泛应用。

参考文献

- [1] 王娜,宋文胜,冯晓云.基于载波移相控制的脉冲整流器直流侧支撑电容电压谐波抑制研究[J].机车电传动,2012(2):34-39.
WANG Na, SONG Wensheng, FENG Xiaoyun. Research on harmonic suppression of DC side support capacitor voltage of pulse rectifier based on carrier phase-shift control[J]. Electric Drive for Locomotives, 2012(2):34-39.
- [2] TAKEI D, FUJIMOTO H, HORI Y. Load current feedforward control of boost converter for downsizing output filter capacitor [C]/Proceedings of the 40th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON), Dallas, TX, USA:IEEE,

- 2014:1581-1586.
- [3] 姚绪梁,罗兴鸿,马赫,等.小电容双PWM调速系统直流母线电压波动抑制策略[J].电工技术学报,2022,37(12):2971-2981.
- YAO Xuliang, LUO Xinghong, MA He, et al. Suppression strategy of DC bus voltage fluctuation for small capacitor dual PWM speed regulation system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(12): 2971-2981.
- [4] 孟凡丽.混合储能抑制直流母线电压波动的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2017.
- MENG Fanli. Research on DC bus voltage fluctuation suppression based on hybrid energy storage[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2017.
- [5] 杜新,朱凌.基于功率前馈的直流母线电压控制方法研究[J].电力科学与工程,2013,29(8):6-9,26.
- DU Xin, ZHU Ling. Research on DC bus voltage control method based on power feedforward[J]. Electric Power Science and Engineering, 2013, 29(8): 6-9, 26.
- [6] ZHANG Y, ZHANG J, ZHAO J, et al. Modified feedforward control to suppress DC voltage disturbances for three-stage MMC-PET[C]//Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Baltimore, MD, USA: IEEE, 2019:4632-4638.
- [7] 卡里哈尔·安尼万别克.直驱励磁风电机组的直流侧电压波动抑制及低电压穿越控制[D].重庆:重庆大学,2015.
- ANVARBEK Shalhar. Control of DC side voltage fluctuation suppression and low voltage ride through for direct-driven electrically excited wind turbines[D]. Chongqing: Chongqing University, 2015.
- [8] 郭强,何黎鹏,肖蕙蕙,等.一种实现电流型PWM整流器直流侧电压波动抑制的控制方法[J].仪器仪表学报,2023,44(6):313-324.
- GUO Qiang, HE Lipeng, XIAO Huihui, et al. Control method for suppressing DC side voltage fluctuation of current-source PWM rectifier[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2023, 44(6): 313-324.
- [9] 张少如.三相桥式整流的功率因数校正技术的研究[D].天津:天津大学,2008.
- ZHANG Shaoru. Research on power factor correction technology of three-phase bridge rectification[D]. Tianjin: Tianjin University, 2008.
- [10] 王久和,李华德,王立明.电压型PWM整流器直接功率控制系统[J].中国电机工程学报,2006,26(18):54-60.
- WANG Jiuhe, LI Huade, WANG Liming. Direct power control system of voltage-source PWM rectifier[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 54-60.
- [11] GU B G, NAM K H. A DC link capacitor minimization method through direct capacitor current control[C]//Proceedings of the 37th IEEE Industry Applications Conference Annual Meeting (IAS), Pittsburgh, PA, USA: IEEE, 2002, 2: 811-817.
- [12] 王成山,李微,王议锋,等.直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J].中国电机工程学报,2017,37(1):84-98.
- WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. Review on classification and suppression methods of DC microgrid bus voltage fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-98.
- [13] 张剑,李文善,温旭辉,等.基于电压功率角前馈的永磁同步电机单位功率因数控制策略研究[J].中国电机工程学报,2020,40(S1):281-293.
- ZHANG Jian, LI Wenshan, WEN Xuhui, et al. Research on unity power factor control strategy of permanent magnet synchronous motor based on voltage power angle feedforward[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(S1): 281-293.
- [14] 李永东.交流电机数字控制系统[M].北京:机械工业出版社,2012.
- LI Yongdong. Digital control system of AC motor[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [15] WEN Zhixu, LUO Zhiwei, YANG Jingbo, et al. Load current feedforward for voltage stabilization control in extended range generator sets based on sliding mode observer[C]//Proceedings of the 7th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE), Yangzhou, China, IEEE, 2024: 409-415.

收稿日期:2025-08-04

修改稿日期:2026-03-03