

基于LADRC的压缩空气储能系统 并网逆变器控制

孙悦悦,李梦达,裴光耀,朱航航,宁晗
(上海电机学院 电气学院,上海 201306)

摘要:由于压缩空气储能系统并网逆变器电压容易受电网电压波动影响,因此为提高压缩空气储能膨胀发电系统中电网侧逆变器直流母线电压及系统实际输出功率的动态性能及稳定性,减小波动,将二阶线性自抗扰控制(LADRC)技术应用在网侧电压控制中,形成新型双闭环控制结构。建立了膨胀发电系统并网逆变器的数学模型,分析了LADRC的工作原理,并将传统的PI控制和所研究的控制策略作对比。仿真结果表明,设计的控制策略相较于PI控制可使直流侧电压更加迅速进入稳定状态,并网电流的总谐波畸变率(THD)变得更小,且具备更好的抗扰能力。

关键词:压缩空气储能;并网逆变器;直流母线电压;线性自抗扰控制;抗扰能力

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed25708

Control of Compressed Air Energy Storage System Grid-connected Inverter Based on LADRC

SUN Yueyue, LI Mengda, PEI Guangyao, ZHU Hanghang, NING Han

(School of Electrical Engineering, Shanghai Dianji University, Shanghai 201306, China)

Abstract: Since the compressed air energy storage system grid-connected inverter voltage is always influenced by voltage fluctuations of the power grid with little problem, for the sake of ameliorating the dynamic and stable performance of the DC bus voltage of the inverter on the side of the grid and the actual output power of the system in the compressed air energy storage expansion power generation system and reducing the fluctuations, second-order linear active disturbance rejection control (LADRC) technique was used in the voltage outer loop control, a new-style double closed loop control construction was formed. The mathematical model of the grid-connected converter of expansion power generation system was established, the operating principle of LADRC was researched, and the conventional PI control was contrasted with the control methods studied. The simulation results indicate that when make a contrast with the conventional control methods, the control methods designed can make the DC voltage enter the stable state more quickly, the total harmonic distortion (THD) of the grid-connected current becomes smaller, and has better disturbance immunity.

Key words: compressed air energy storage; grid-connected inverter; DC bus voltage; linear active disturbance rejection control (LADRC); immunity to disturbance

随着各类可再生能源系统不断并网,越来越多的新型储能技术需被用于解决新能源并网产生的一系列问题^[1]。目前,应用较多的储能技术种类有电池储能、压缩空气储能、飞轮储能以及抽水蓄能等。其中,压缩空气储能技术因具有无污染、效率较高、周期长、大容量储能且绿色环保的特点而被广泛应用^[2-3],有较好的发展前景,继

续研究压缩空气储能技术对促进智能电网发展具有重要意义^[4]。在压缩空气储能膨胀发电系统中,并网逆变器的设计是整个系统控制的核心,是实现直流到交流转换的变换器,同时也是压缩空气储能膨胀发电机组与电网连接的主要装置。提高并网逆变器的控制性能有益于系统稳定运行,一般对其应用电压电流双闭环控制策略以稳

基金项目:教育部重点实验室开放基金项目(NEPUME-kfj-026)

作者简介:孙悦悦(1995—),女,硕士研究生,主要研究方向为电力系统控制与压缩空气储能技术,Email:3123505781@qq.com

通讯作者:李梦达(1980—),男,博士研究生,副教授,主要研究方向为可再生能源与分布式发电中的电力电子技术,Email:limd@sdju.cn

定母线电压^[5-8],系统构造简易。其中,电压电流双闭环PI控制策略在工程上有着广泛应用,但这种传统的控制方法会在一定程度上导致系统产生过大的超调量,并影响控制性能,使系统无法满足控制要求^[9-10]。

为使并网逆变器在压缩空气储能膨胀发电系统中具有更好的控制性能,国内外专家开始研究改进型控制策略以弥补传统控制策略中所存在的不足之处,达到更好的控制效果。文献[11]提出了采用改进模型预测控制的双闭环优化控制方法取代传统的PI双闭环控制,虽然采用该方法对直流侧母线电压的动态响应速度有所提高,但该控制策略的运用需要基于精确的数学模型,计算量较大。文献[12]通过电机负载信息重构直流母线电容电流,从而提高了直流侧电压的抗扰能力,但该方法容易受电机参数影响。文献[13]研究了一种基于前馈解耦的电压电流双闭环控制技术,虽然该方法可使输出电压快速进入稳定状态,但存在参数整定困难的情况。文献[14]提出了一种基于动态贝叶斯网络的模型预测控制的数据驱动方法,利用贝叶斯网络的预测能力来实现模型预测控制,该控制策略既能实现稳定的控制性能,又能实现鲁棒的控制性能,但会增加系统控制结构的复杂性。文献[15]将滑模控制法应用在电压外环上,同时电流内环增加电流预测的方法,该控制策略虽然能够减小网侧谐波影响并提高母线电压稳定性,但会使控制器结构变得更加复杂,难以实现。由此可见,工程上对各类控制技术的研究已经相对深入且应用也比较普遍,但各种控制技术在应用的过程中也存在一些弊端,因此继续对控制技术进行优化研究意义重大。

本文以压缩空气储能膨胀发电系统并网逆变器直流母线电压为控制对象,构造出基于LADRC的并网逆变器电压控制结构,替代了传统的PI控制技术。该控制策略可实现对扰动的观测与干扰补偿,从而有效提高直流侧电压的稳定性,同时使系统输出功率更加迅速且准确地追踪到需求功率的变化。

1 并网逆变器的数学模型及控制

1.1 膨胀发电系统并网逆变器的数学模型

压缩空气储能膨胀发电系统结构如图1所示,采用膨胀机与直驱型永磁同步发电机直接相连并通过机侧整流器和网侧逆变器并入电网。

机侧整流器控制可实现膨胀机以最佳转速运行;网侧逆变器控制则保证网侧输出功率可以迅速且准确地跟踪需求功率的变化,同时使母线电压保持稳定。

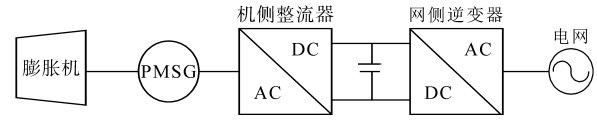


图1 膨胀发电系统结构

Fig.1 Expansion power generation system structure

图2所示为膨胀发电系统并网逆变器结构图。图中,C为直流母线电容; I_{dc} 、 U_{dc} 分别为直流母线电流和电压; R 为等效电阻; L 为等效电感。

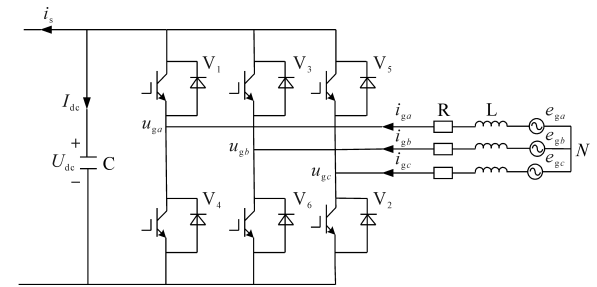


图2 网侧逆变器结构

Fig.2 Grid side inverter structure

三相坐标系下并网逆变器数学模型为^[16]

$$\begin{cases} Ldi_{ga}/dt = e_{ga} - Ri_{ga} - u_{ga} \\ Ldi_{gb}/dt = e_{gb} - Ri_{gb} - u_{gb} \\ Ldi_{gc}/dt = e_{gc} - Ri_{gc} - u_{gc} \\ CdU_{dc}/dt = \sum_{k=a,b,c} S_k i_{gk} - i_s \end{cases} \quad (1)$$

式中: i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} 为网侧电流; u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} 为逆变器三相电压; e_{ga}, e_{gb}, e_{gc} 为网侧电压; i_s 为负载电流。

其中

$$S_k = \begin{cases} 1 & \text{上桥臂导通,下桥臂关断} \\ 0 & \text{上桥臂关断,下桥臂导通} \end{cases} \quad k = a, b, c \quad (2)$$

$d-q$ 坐标系下并网逆变器数学模型为

$$\begin{cases} Ldi_{gd}/dt = e_{gd} - u_{gd} - Ri_{gd} + \omega Li_{gq} \\ Ldi_{gq}/dt = e_{gq} - u_{gq} - Ri_{gq} - \omega Li_{gd} \\ CdU_{dc}/dt = \frac{3}{2} \sum_{x=d,q} S_x i_{gx} - i_s \end{cases} \quad (3)$$

式中: e_{gd}, e_{gq} 为网侧电压的 d, q 轴分量; u_{gd}, u_{gq} 为逆变器电压的 d, q 轴分量; i_{gd}, i_{gq} 为网侧电流的 d, q 轴分量; ω 为电网角频率; S_x 为开关函数的 d, q 轴分量。

1.2 电压定向矢量控制

并网逆变器电压定向矢量控制通常由电压外环和电流内环构成^[17]。图3所示为 $\alpha-\beta$ 和 $d-q$ 坐标系下电压电流向量图, E 为电网电压空间矢

量,则 $e_{gd} = |E|, e_{gq} = 0$ 。

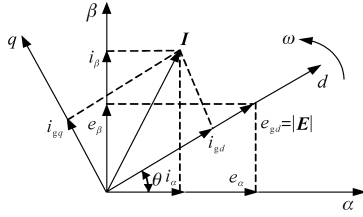


图3 α - β 和 d - q 坐标系下电压电流向量图
Fig.3 The vector diagram of voltage and current in α - β and d - q coordinate system

由于 i_{gd}, i_{gq} 在稳态情况下为直流,则微分项为零,因此由式(3)可得:

$$\begin{cases} u_{gd} = e_{gd} - Ri_{gd} + \omega Li_{gq} \\ u_{gq} = -Ri_{gq} - \omega Li_{gd} \end{cases} \quad (4)$$

对于双闭环控制模型可将电压外环的输出值用作电流内环有功电流的设定值,使直流母线电压保持稳定,将无功电流设为零以完成单位功率因数并网^[18]。可得输出控制方程为

$$\begin{cases} u_{gd} = -(K_{ip} + K_{il}/s)(i_{dref} - i_{gd}) + \omega Li_{gq} + e_{gd} \\ u_{gq} = -(K_{ip} + K_{il}/s)(i_{qref} - i_{gq}) - \omega Li_{gd} + e_{gq} \end{cases} \quad (5)$$

式中: K_{ip}, K_{il} 为电流内环的比例系数和积分系数; i_{dref}, i_{qref} 为内环 d 轴和 q 轴设定值。

将式(5)代入式(3)得:

$$\begin{cases} \frac{di_{gd}}{dt} = (K_{ip} + K_{il}/s)(i_{dref} - i_{gd}) - \frac{R}{L}i_{gd} \\ \frac{di_{gq}}{dt} = (K_{ip} + K_{il}/s)(i_{qref} - i_{gq}) - \frac{R}{L}i_{gq} \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)可知, d 轴和 q 轴输出电流完成了解耦控制^[19]。

1.3 锁相环控制技术

压缩空气储能系统并网时需实时检测电网电压矢量的相位,而锁相环技术可使输出信号在频率及相位上同电网电压矢量保持一致。由于电网变化具有不可控性,因此选择性能较好的锁相环为系统提供准确的电网电压矢量同步信号至关重要。

单同步坐标系锁相环(single synchronous reference frame phase-locked loop, SSRF-PLL)是一种较为典型的锁相环技术。SSRF-PLL矢量图如图4所示, U_s 为实际电压矢量, U_{PLL} 为锁相环输出电压矢量, θ 为实际电压矢量角度, θ' 为锁相环输出电压矢量角度。

当电网电压相位突变时,矢量 U_{PLL} 和 U_s 将无法保持在同一位置,因此需设计合适的闭环控制

使 $\theta' = \theta$ 。SSRF-PLL的控制结构如图5所示。 ω_0 为 U_{PLL} 的旋转角速度。

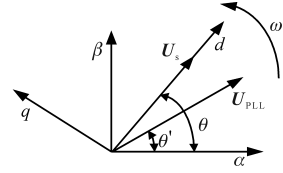


图4 SSRF-PLL矢量图
Fig.4 SSRF-PLL vector diagram

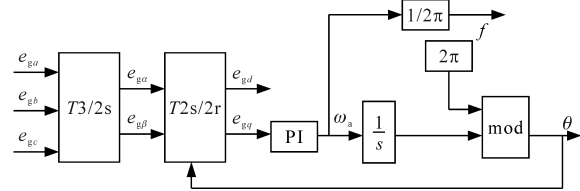


图5 SSRF-PLL控制结构图

Fig.5 SSRF-PLL control structure diagram

2 电压外环二阶LADRC控制策略

2.1 二阶LADRC的基本原理

自抗扰控制技术可对总扰动进行估计并补偿^[20],参数整定简易。LADRC结构图如图6所示,LESO为线性扩张状态观测器;LSEF为线性状态误差反馈控制率; z_1, z_2, z_3 为LESO的三个状态变量; v 为参考输入; y 为控制输出; b_0 为控制器增益; u 为控制量。

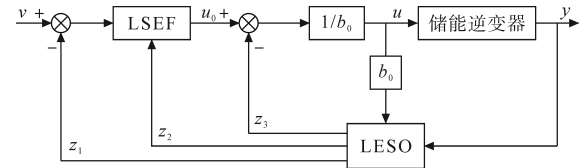


图6 LADRC结构图

Fig.6 LADRC structure

假设有二阶系统为

$$\ddot{y} = f(y, \dot{y}, w, t) = -a_1 \dot{y} - a_2 y + w + bu \quad (7)$$

式中: w 为未知扰动; a_1, a_2 为未知系统参数; b 为控制增益。

b_0 为 b 的已知部分,式(7)可改为

$$\ddot{y} = -a_1 \dot{y} - a_2 y + w + (b - b_0)u = f + b_0 u \quad (8)$$

式中: f 为不确定的总扰动。

令 $x_1 = y, x_2 = \dot{y}, x_3 = f$, 因此式(8)可改为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + b_0 u \\ \dot{x}_3 = h \\ y = x_1 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可构建三阶LESO:

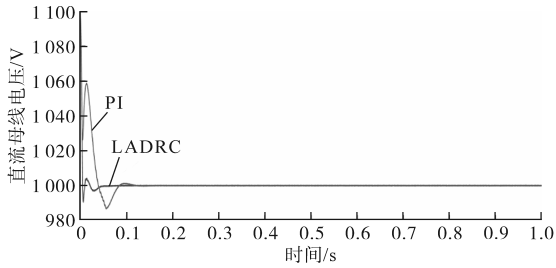


图8 需求功率不变时直流侧母线电压对比图
Fig.8 Comparison of bus voltage at DC side with constant power demand

阶LADRC控制器进行电压外环控制的输出功率曲线大概在0.1 s进入稳态。由此可见,采用二阶LADRC控制的输出功率相较于PI控制的输出功率超调量更小,达到稳态所需时间更短。

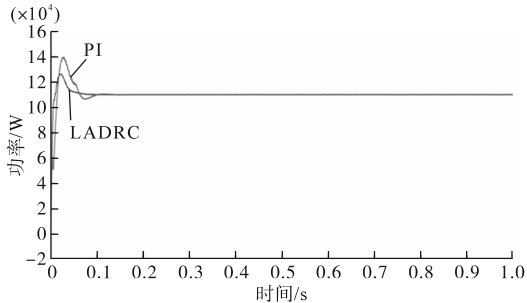


图9 需求功率不变时输出功率对比图
Fig.9 Comparison of output power with constant demand power

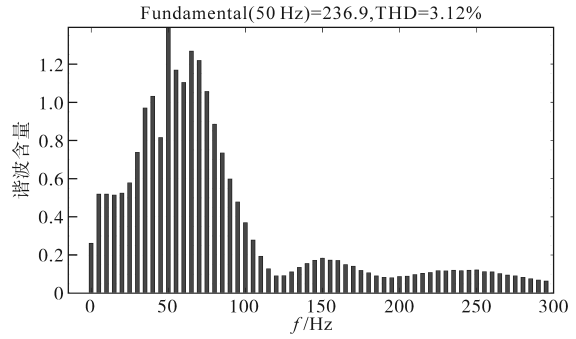
图10为PI和LADRC控制下a相并网电流的谐波分析对比图。由仿真图可见,采用二阶LADRC控制可抑制并网电流的谐波,并网电流的总谐波畸变率(THD)由3.12%降至1.05%,可使输出的正弦波形更饱满,提升了并网的电能质量。

图11为需求功率不变时电网电流在PI及LADRC控制下的对比图。采用LADRC控制策略时,电网电流仅需0.03 s可进入稳定状态,比PI控制策略响应速度快0.04 s,且抗扰能力要优于PI控制策略。

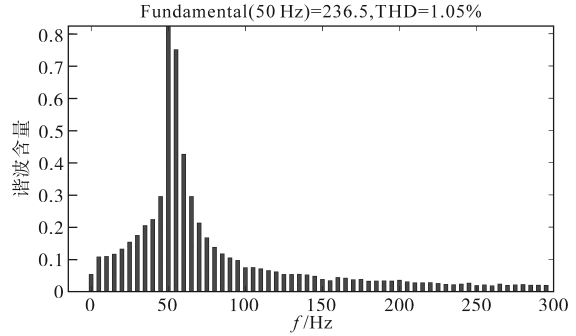
3.2 网侧需求功率变化时仿真分析

设定压缩空气储能膨胀发电系统在网侧需求功率分别在0.4 s与0.7 s发生变化,由110 kW下降至85 kW再上升至98 kW时,采用LADRC及PI控制器分别进行电压外环控制,其他条件均不变,进行仿真验证。

图12为需求功率变化时直流侧母线电压在PI及LADRC控制下的波形图。由仿真图可见,当电网需求功率在0.4 s和0.7 s发生变化时,逆变器母线电压会相应发生扰动。当采用PI控制时,电压在0.4 s和0.7 s发生波动后需在0.1 s内恢复到额定电压1 000 V,且进入稳态前超调量达到了



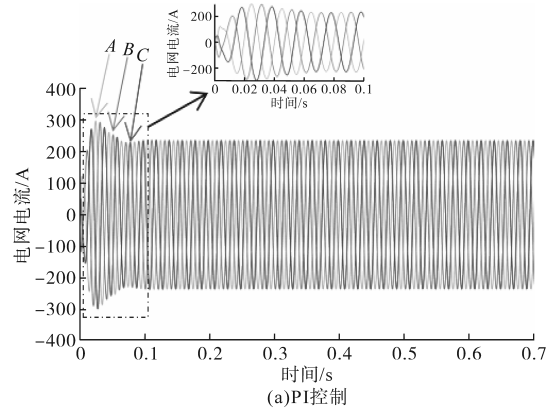
(a)PI控制下a相并网电流谐波



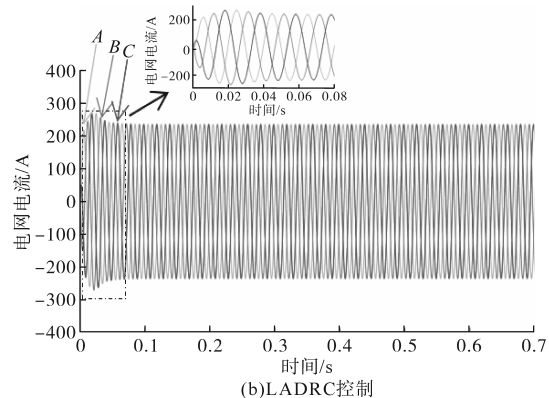
(b)LADRC控制下a相并网电流谐波

图10 两种控制策略下a相并网电流谐波分析

Fig.10 Harmonic analysis of a phase grid-connected current under two control strategies



(a)PI控制



(b)LADRC控制

图11 两种控制策略下电网电流波形

Fig.11 Current waveforms of power grid under two control strategies 5.8%。当采用二阶LADRC控制时,电压在0.4 s和0.7 s发生波动后仅在0.08 s内便恢复到额定电压,且进入稳态前超调量为1%。由此可见,在网

侧需求功率变化的情况下采用二阶LADRC控制相较于PI控制直流母线电压超调量更小,且稳态精度更高。

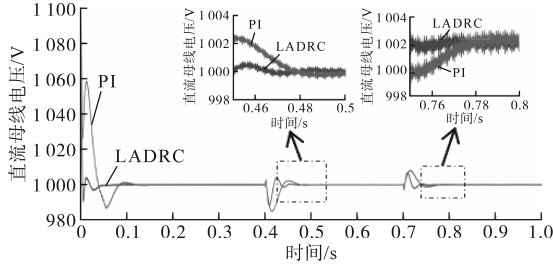


图12 需求功率变化时直流侧母线电压对比图

Fig.12 Comparison diagram of bus voltage on the DC side with changed demand power

图13为需求功率变化时系统输出功率在PI及LADRC控制下的波形图。由仿真图可见,当电网需求功率在0.4s和0.7s发生改变时,系统输出功率会跟随需求功率做出相应的变化。当采用PI控制时,系统输出功率曲线在0.4s和0.7s发生相应的变化后,需在0.1s内跟踪到需求功率的变化值,且超调量高于采用二阶LADRC控制时输出功率曲线的超调量。采用二阶LADRC控制时,系统输出功率在0.4s和0.7s发生相应的变化后仅0.08s内便追踪到需求功率的变化值。由此可见,在网侧需求功率变化的情况下采用二阶LADRC控制相较于PI控制系统输出功率超调量更小,且可以更加迅速准确地追踪到需求功率的变化值。

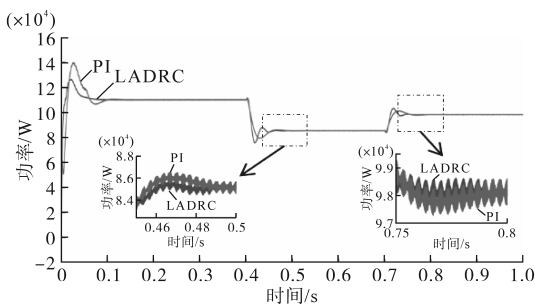
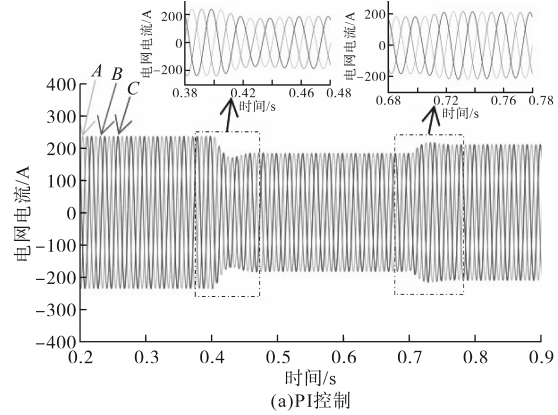


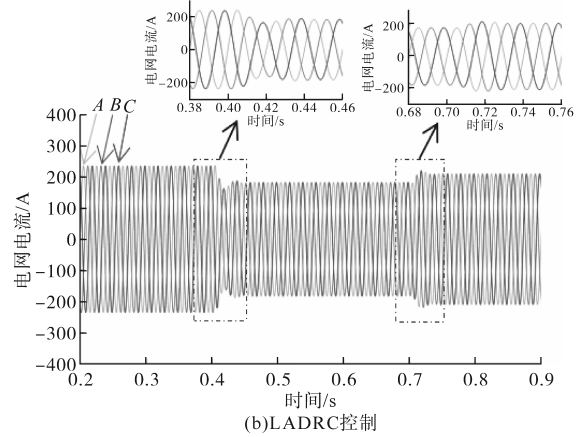
图13 需求功率变化时输出功率对比图

Fig.13 Comparison diagram of output power with changed demand power

图14为需求功率变化时电网电流在PI及LADRC控制下的对比图。当电网需求功率在0.4s和0.7s发生变化时,电网电流会同时发生扰动。采用LADRC控制策略时,电网电流可在0.04s内进入新的稳态,比PI控制策略快0.03s,控制效果更佳。



(a)PI控制



(b)LADRC控制

图14 两种控制策略下电网电流波形

Fig.14 Current waveforms of power grid under two control strategies

4 结论

由于采用传统的PI控制器对压缩空气储能膨胀发电系统并网逆变器进行控制时会出现直流侧母线电压超调量较大且进入稳态速度较慢等现象,因此本文设计了基于LADRC的控制结构。仿真对比结果表明,本文所设计的控制方式无论在网侧需求功率保持不变还是变化的情况下均可明显提高系统的响应速度,减小直流侧母线电压的波动,使系统输出功率可迅速且准确地追踪到需求功率的变化,降低并网电流的谐波,提高电能质量。本文设计的二阶LADRC控制器对压缩空气储能膨胀发电系统并网逆变器的控制效果显著,具有重要意义。

参考文献

[1] 孙晓霞,桂中华,高梓玉,等.压缩空气储能系统动态运行特性[J].储能科学与技术,2023,12(6):1840-1853.
SUN Xiaoxia, GUI Zhonghua, GAO Ziyu, et al. Dynamic characteristics of compressed air energy storage system[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(6): 1840-1853.

[2] 张玮灵,古含,章超,等.压缩空气储能技术经济特点及发展

- 趋势[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1295-1301.
- ZHANG Weiling, GU Han, ZHANG Chao, et al. Technical economic characteristics and development trends of compressed air energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1295-1301.
- [3] XU Y H, ZHANG H G, YANG F B, et al. Performance of compressed air energy storage system under parallel operation mode of pneumatic motor[J]. Renewable Energy, 2022, 200: 185-217.
- [4] 吴晨曦, 陈泽昊, 张杰, 等. 考虑先进绝热压缩空气储能的风力发电系统成本/供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 62-71, 75.
- WU Chenxi, CHEN Zehao, ZHANG Jie, et al. Cost/power supply reliability assessment of wind power generation system considering advanced adiabatic compressed air energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 62-71, 75.
- [5] 敦若楠, 郭英军, 孙鹤旭, 等. 基于混合储能的直流微网母线电压控制策略[J]. 河北工业科技, 2019, 36(6): 384-389.
- DUN Ruonan, GUO Yingjun, SUN Hexu, et al. DC microgrid bus voltage control strategy based on hybrid energy storage[J]. Hebei Journal of Industrial Science and Technology, 2019, 36(6): 384-389.
- [6] 靳舵, 张厚升, 蒋俊杰, 等. 三相并网逆变器模型预测控制研究[J]. 山东电力技术, 2023, 50(4): 7-12.
- JIN Duo, ZHANG Housheng, JIANG Junjie, et al. Research on model predictive control of three-phase grid-connected inverter[J]. Shandong Electric Power, 2023, 50(4): 7-12.
- [7] 孙思男, 郝正航. 基于电压电流双环控制的蓄电池并网研究[J]. 电子科技, 2023, 36(2): 13-21.
- SUN Sinan, HAO Zhenghang. Research on battery grid connection based on voltage and current double loop control[J]. Electronic Science and Technology, 2023, 36(2): 13-21.
- [8] ZHOU X S, LIU Q, MA Y, et al. DC-link voltage research of photovoltaic grid-connected inverter using improved active disturbance rejection control[J]. IEEE Access, 2021, 9: 9884-9894.
- [9] 王晗, 王富文, 周党生, 等. 电网故障下永磁直驱风电机组并网电流的自抗扰控制[J]. 上海交通大学学报, 2023, 159: 1-18.
- WANG Han, WANG Fuwen, ZHOU Dangsheng, et al. Active disturbance rejection control strategy for current of direct drive wind turbine under power grid fault[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2023, 159: 1-18.
- [10] SOLIMAN M A, HASANIEN H M, AL-DURRA A, et al. A novel adaptive control method for performance enhancement of grid-connected variable-speed wind generators[J]. IEEE Access, 2020, 8: 82617-82629.
- [11] 徐元中, 姚博怀, 吴铁洲, 等. 改进模型预测控制的双闭环优化控制策略[J]. 电源技术, 2020, 44(12): 1831-1834.
- XU Yuanzhong, YAO Bohuai, WU Tiezhou, et al. Double closed-loop optimal control strategy of improved model predictive control[J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(12): 1831-1834.
- [12] WANG X, LIN H. DC-link current estimation for load-side converter of brushless doubly-fed generator in the current feedforward control[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(8): 1703-1710.
- [13] 朱胜杰, 张厚升. 直流微电网双向全桥DC/DC变换器控制策略[J]. 山东电力技术, 2020, 47(9): 1-6.
- ZHU Shengjie, ZHANG Housheng. Control strategy of bidirectional full-bridge DC/DC converter for DC microgrid[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(9): 1-6.
- [14] WANG H, HUANG Q, LI Z S. A dynamic bayesian network control strategy for modeling grid-connected inverter stability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2022, 71(1): 75-86.
- [15] 周雪松, 刘茂, 马幼捷, 等. 改进二阶LADRC的风电逆变器母线电压控制[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 43-50.
- ZHOU Xuesong, LIU Mao, MA Youjie, et al. Improved bus voltage control of second-order LADRC wind power inverter[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 43-50.
- [16] 胡兴洋. 基于双PWM变流器永磁同步发电机水电并网系统设计[D]. 长沙: 湖南大学, 2020.
- HU Xingyang. Design of permanent magnet synchronous generator hydropower grid-connected system based on dual PWM converter[D]. Changsha: Hunan University, 2020.
- [17] HOSSAIN M, POTA H, HARUNI A, et al. DC-link voltage regulation of inverters to enhance microgrid stability during network contingencies[J]. Electric Power Systems Research, 2017, 147: 233-244.
- [18] 吴嘉禾. 直驱型压缩空气储能发电系统并网控制[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- WU Jiahe. The grid connection control strategy of compressed air energy storage with directly driven generator[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2020.
- [19] SONG Z, TIAN Y, YAN Z, et al. Direct power control for three-phase two-level voltage-source rectifiers based on extended-state observation[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(7): 4593-4603.
- [20] 韩京清. 自抗扰控制技术—估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2008.
- HAN Jingqing. Active disturbance rejection control technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

收稿日期: 2024-03-20

修改稿日期: 2024-05-09