

电流控制型储能变流器控制稳定性分析与谐波谐振抑制技术研究*

李 智¹, 李长喜², 陈创庭³, 刘明波¹, 巩 宇^{4,5}, 张中华⁶, 张扬帆^{4,5}

- [1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510641; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000;
3. 广东能源集团科学技术研究院有限公司, 广东 广州 510620;
4. 国网冀北电力科学研究院(华北电力科学研究院有限责任公司), 北京 100045;
5. 国家电网公司风光储联合发电运行技术实验室, 北京 100045;
6. 中国商飞上海飞机设计研究院, 上海 201210]

摘 要: 储能变流器是储能系统平抑新能源电站功率波动和支撑电网调频调压功能的核心载体。对储能变流器关键运行控制技术特别是电流控制模式下的控制策略进行研究, 提出了电流内环无静差跟踪控制策略, 建立了 PI 控制器比例、积分关键控制参数最佳阻尼比优化设计方法。基于开环幅相频率特性和开环对数频率特性方法, 构建计及储能变流器电流内环的开环频域模型。通过 Bode 稳定判据, 定量分析了不同电流内环比例系数、积分参数以及变流器阻感参数变化对储能变流器控制稳定性的影响, 并采用 Nyquist 稳定判据对比验证, 在实时数字仿真试验平台(RT-LAB)开展储能变流器并网测试, 不同比例系数和积分系数下的并网系统均保持稳定。基于滤波器的输入电压到输出电流的传递函数, 发现储能变流器存在谐波谐振问题, 提出基于电容电流反馈的有源阻尼谐振抑制策略, 有效消除谐波谐振影响。分析结果表明, 所设计的储能变流器及其谐波谐振抑制策略, 具备鲁棒性, 能够为大型新能源电站建设提供有力支撑。

关键词: 储能变流器; 参数设计; 稳定性; 谐波谐振; 抑制策略

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2023)07-0021-08

doi: 10.12177/emca.2023.078

Control Stability Analysis and Research on Harmonic Resonance Suppression Technology of Current-Control Type Energy Storage Converter*

LI Zhi¹, LI Changxi², CHEN Chuangting³, LIU Mingbo¹, GONG Yu^{4,5},
ZHANG Zhonghua⁶, ZHANG Yangfan^{4,5}

- [1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;
2. XJ Electrical Co., Ltd., Xuchang 461000, China;
3. Guangdong Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510620, China;
4. State Grid Jibei Electric Power Research Institute (North China Electric Power Research Institute Co., Ltd.), Beijing 100045, China;
5. State Grid Wind-Photovoltaic-Energy Storage Hybrid Power Generation Technology Laboratory, Beijing 100045, China;

收稿日期: 2022-09-29; 收到修改稿日期: 2023-04-11

* 基金项目: 国家电网有限公司科技项目(4000202114068A0000)

作者简介: 李 智(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与调度运行控制。

巩 宇(1987—), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源发电与并网运行技术。

6. COMAC Shanghai Aircraft Design & Research Institute, Shanghai 201210, China]

Abstract: The energy storage converter is the core carrier of the energy storage system to smooth the power fluctuations of renewable energy generation and to support the regulation of frequency and voltage. The key operation control technology of energy storage converter, especially the control strategy under current-control mode, is investigated. The tracking control strategy without static error of current inner loop is proposed. The design method of the PI control key parameters based on optimal damping ratio is proposed. Based on open-loop amplitude-phase frequency characteristic and open-loop logarithmic frequency characteristic method, the open-loop frequency domain model of the current inner loop of the energy storage converter is constructed. Through the Bode stability criterion, the influence of different current inner loop proportional coefficient, integral coefficient and converter resistance parameter change on the control stability of the energy storage converter is quantitatively analysed. At meanwhile, the Nyquist stability criterion is used to verify the results. The grid-connected test of the energy storage converter is carried out on the real time laboratory (RT-LAB) platform. The grid-connected system remains stable under the different proportional coefficient and integral coefficient. Based on the transfer function of filter capacitor input voltage to output current, the problem of harmonic resonance is found. The active damping resonant suppression strategy based on capacitor current feedback is proposed, which can effectively eliminate the effect of harmonic resonance. The analysis results indicate that the proposed current-control type energy storage converter and its harmonic resonance suppression method is robustness for supporting development of renewable energy generation.

Key words: energy storage converter; parameter design; stability; harmonic resonance; suppression strategy

0 引言

近年来,随着新能源发电技术的广泛应用,新能源出力在电力系统所占比例不断升高^[1]。然而,基于电力电子接口装置的新能源发电并网控制模式并未具备满足电力系统需求的固有惯性和调频调压控制能力的条件,在高渗透率新能源并网场景下,电网稳定性问题越发严峻。此外,新能源出力的随机性亦会引发局部电网功率波动,在未来新型电力系统中会制约新能源发电安全接入问题。因此,如何解决新能源发电的安全稳定接入问题,提高电力系统对新能源的消纳能力,是新型电力系统研究工作的重点内容之一。

变流器作为衔接储能单元与电网的核心部件,通过控制变流器能够保证并网接口稳定可靠运行,实现储能系统的大功率电能存储及释放的双向流通能力,有效平抑新能源输出功率波动,稳定并网点电压和频率,在电网电压跌落期间还能提供无功支撑,增加系统安全稳定运行裕度^[2-8]。国内外学者已经针对与光伏逆变器相关的谐振问题开展了一些研究工作。文献[9]发现储能变流器在弱电网运行过程中存在稳定性问题,研究了电压型储能变换器控制算法,并通过阻抗模型分析其稳定性。文献[10]建立了储能变流器的数

学模型,考察了储能系统在功率偏差控制和转子角速度偏差控制两种控制模式下,对发电机转子角速度和输出电磁功率的影响。文献[11]建立了包含光伏电池动态模型的系统小信号模型,基于劳斯稳定判据,分析了恒流充电模式下接口变流器的稳定工作条件。现有文献[12-15]主要研究了微电网运行场景下储能变流器单体及其在并网环节下参数设计和稳定性问题,而对于普遍应用于接入大电网的电流控制型储能变流器电流内环控制策略及其控制参数或元器件参数对稳定性的影响尚未开展充分研究,且针对储能变流器谐振机理分析与谐振抑制策略的分析存在不足。

针对上述问题,本文对储能变流器电流控制模式下的控制策略进行了研究,分析了既适用于高功率支撑能力,又具备快速动态响应能力的储能变流器拓扑结构及特征参数设计技术,基于I型系统适应小扰动乃至阶跃扰动工况下的储能变流器无静差跟踪控制策略,提出了比例、积分关键控制参数优化设计方法;考虑开环幅相频率特性和开环对数频率特性方法,构建计及储能变流器电流内环的开环频域模型;通过Bode稳定判据,定量分析了不同电流内环比例系数、积分参数以及变流器阻感参数变化对储能变流器控制稳定性的影响。针对LCL型储能变流器谐波谐振特性,

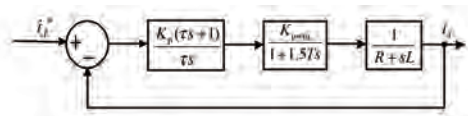


图4 电流内环d轴等效控制框图

为简化参数整定,将PI控制器零点与阻感的极点相消,则电流内环开环传递函数如下所示:

$$G(s) = \frac{K_p K_{pwm}}{Ls(1 + 1.5Ts)} \quad (3)$$

零极点相消后电流内环闭环传递函数如下所示:

$$\left\{ \begin{aligned} G(s) &= \frac{K_p K_{pwm}}{Ls(1 + 1.5Ts) + K_p K_{pwm}} = \\ &= \frac{\frac{2K_p K_{pwm}}{3TL}}{s^2 + \frac{2}{3T}s + \frac{2K_p K_{pwm}}{3TL}} \\ \omega_n &= \sqrt{\frac{2K_p K_{pwm}}{3TL}} \\ \xi &= \sqrt{\frac{L}{6TK_p K_{pwm}}} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

式中: ω_n 为自然频率; ξ 为系统阻尼比。

为使储能变流器控制具备较好的动态响应特性,一般 ξ 取值在0.5~0.6,而为了获得较小的超调量,从而具备较好的稳定性, ξ 一般取值在0.8~1.0。实际工程应用中,最佳阻尼比 ξ 为0.707。计算得到PI控制器的比例系数、积分系数取值,如下所示:

$$\left\{ \begin{aligned} K_p &= \frac{L}{3TK_{pwm}} \\ K_i &= \frac{R}{3TK_{pwm}} \end{aligned} \right. \quad (5)$$

3 电流控制型储能变流器稳定性分析

分析对象假定为按照最佳阻尼比设计的变流器控制参数,基于开环幅相频率特性和开环对数频率特性研究比例、积分参数以及阻感参数变化对稳定性的影响,开环频域表达式为

$$G(j\omega) = \frac{K_{pwm}(K_p s + K_i)}{j\omega(1 + 1.5Tj\omega)(R + Lj\omega)} \quad (6)$$

3.1 滤波电感参数对稳定性影响分析

取 $K_{pwm}=0.866$, $R=0.01 \Omega$,根据最佳阻尼比

得到 $k_p=1.23$, $k_i=12.3$ 。滤波电感 L 分别为0.1、1和10 mH时,储能变流器Bode图如图5所示。

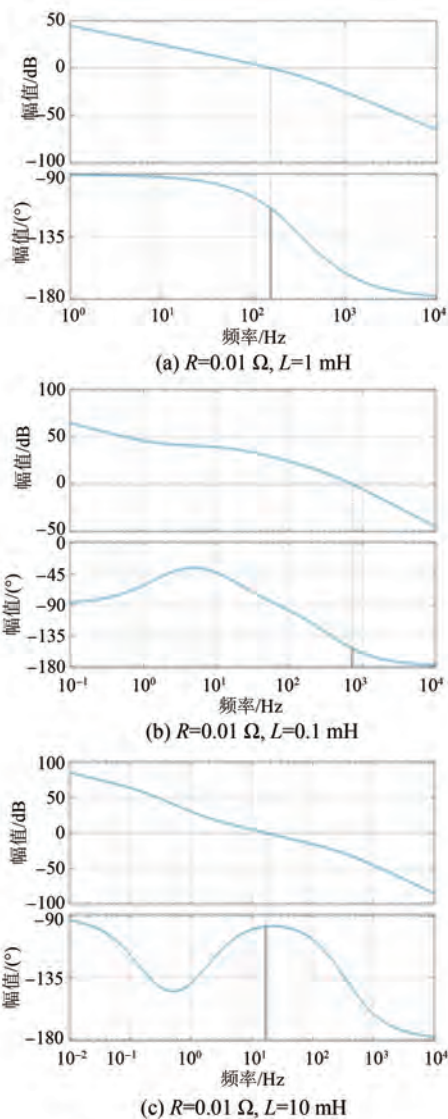


图5 不同滤波电感下的Bode图

由图5可以发现, $L=1$ mH时,截止频率为154 Hz,相角裕量 P_m 为65.6°;当 L 减小为0.1 mH时,截止频率为722 Hz,相角裕量 P_m 为26.3°;当 L 增大为10 mH时,截止频率为17 Hz,相角裕量 P_m 为82.3°。上述滤波电感下系统穿越频率和幅值裕量 G_m 均无穷大。即滤波电感 L 在0.1~10 mH,控制系统相角裕度在26.3°~82.3°范围,储能变流器保持稳定。

3.2 阻尼电阻参数对稳定性影响分析

保持 K_{pwm} , k_p , k_i 不变,滤波电感 $L=1$ mH,阻尼电阻 R 分别为0.001 Ω 和0.1 Ω ,Bode图如图6

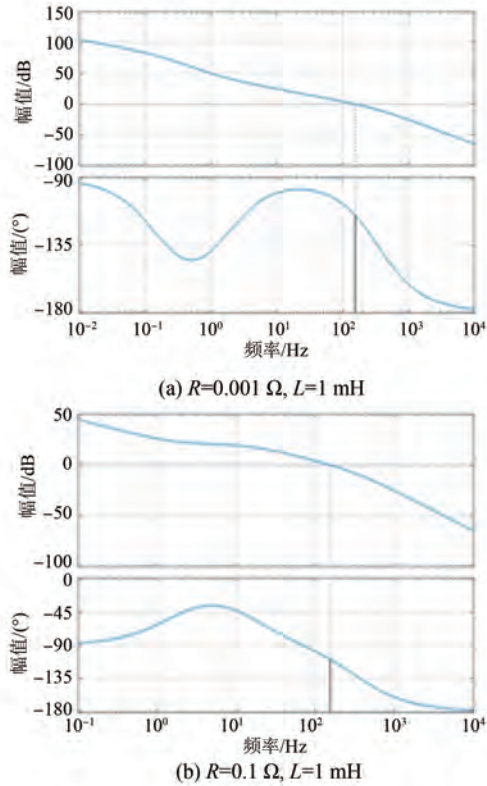


图6 不同阻尼电阻下的 Bode 图

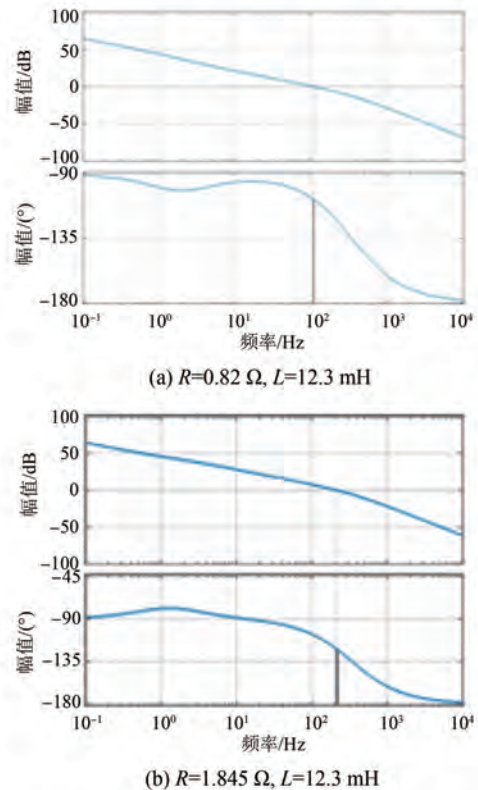


图7 不同比例系数下的 Bode 图

所示。

由图 6 可知, R 减小变为 0.001Ω 时,截止频率为 154 Hz ,相角裕量 P_m 为 65° ; R 增大变为 0.1Ω 时,截止频率为 154 Hz ,相角裕量 P_m 为 71° ,系统的穿越频率和幅值裕量 G_m 均为无穷大。由图 6 还可知,阻尼电阻 R 值在 $0.001 \sim 0.1 \Omega$ 变化时,储能变流器的相角裕度在 $65^\circ \sim 71^\circ$ 范围内,储能变流器始终处于稳定状态。

3.3 比例系数对稳定性影响分析

在工程应用中,电流内环 PI 控制器参数对控制稳定性作用显著,需要设置合理的控制参数适应稳定控制要求。分析比例系数在 $\pm 50\%$ 范围内变化对控制稳定性的影响,保持 $K_{\text{pwm}} = 0.866$, $k_i = 12.3$, $R = 0.01 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$ 不变,当 k_p 分别为 0.82 和 1.845 时, Bode 图如图 7 所示。

由图 7 可知, $k_p = 0.82$ 时,截止频率为 108 Hz ,相角裕量 P_m 为 72° ; $k_p = 1.845$ 时,截止频率为 215 Hz ,相角裕量 P_m 为 57.8° ,穿越频率和幅值裕量 G_m 均为无穷大。可知 k_p 在 $0.82 \sim 1.845$ 范围内,相角裕度在 $57.8^\circ \sim 72^\circ$ 之间变化,储能变流器

始终处于稳定状态。

3.4 积分系数对稳定性影响分析

保持 $K_{\text{pwm}} = 0.866$, $k_p = 1.23$, $R = 0.01 \Omega$, $L = 1 \text{ mH}$ 不变,当 k_i 分别为 8.2 和 18.45 时, Bode 图如图 8 所示。

由图 8 可知, $k_i = 8.2$,截止频率为 154 Hz ,相角裕量 P_m 为 65.8° ; $k_i = 18.45$,截止频率为 154 Hz ,相角裕量 P_m 为 65.3° ,穿越频率和幅值裕量 G_m 均为无穷大。 k_i 在 $8.2 \sim 18.45$ 范围内,系统的相角裕度在 $65.3^\circ \sim 65.8^\circ$ 之间变化,储能变流器具有一定的鲁棒性。

通过上述分析,可以发现,在储能变流器关键元器件滤波电感 L 和阻尼电阻 R 参数同等倍率变化时,滤波电感 L 参数变化对变流器的稳定性灵敏度影响较大,在滤波电感 L 和阻尼电阻 R 发生变化时,通过所提方法设计的 PI 控制器对变流器控制调节,能够维持设备稳定运行。基于 PI 控制器特性,与积分系数相比,比例系数等幅变化对稳定性灵敏度影响较大,通过频域分析可知,在不同参数下,变流器能够维持稳定运行。

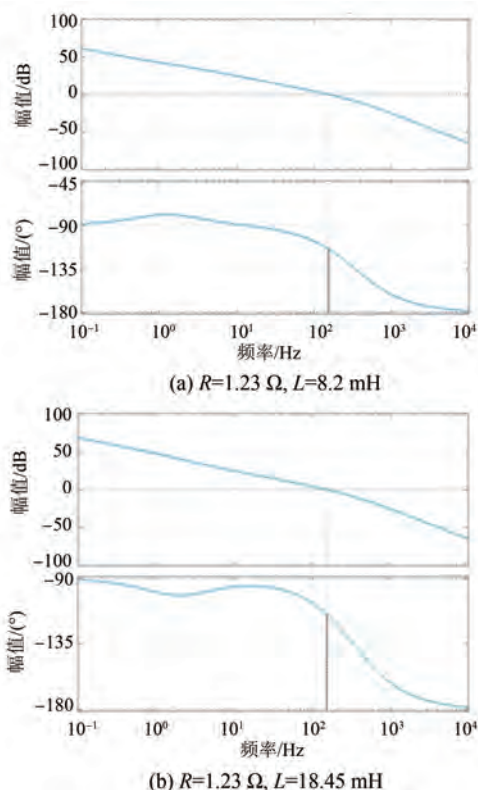


图8 不同积分系数下的 Bode 图

3.5 Nyquist 稳定判据对比分析

Nyquist 稳定判据是用于确定系统动态稳定性的图形方法,本文采用 Nyquist 稳定判据验证 Bode 稳定判据的准确性,考虑篇幅限值,设定 $K_{\text{pwm}}=0.866$, $R=0.01 \Omega$, $k_p=1.23$, $k_i=12.3$, $L=1 \text{ mH}$,电流内环 Nyquist 图如图 9 所示。需根据图形与 $(-1, j0)$ 点位置判别设备稳定性。

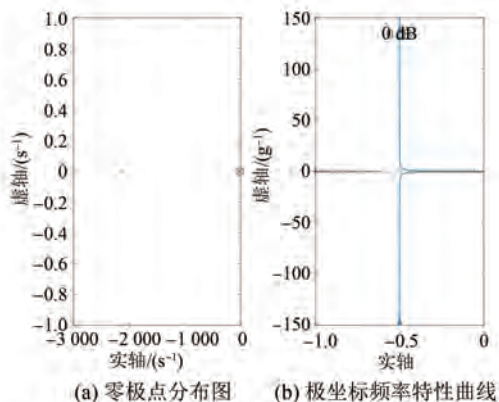


图9 特定参数下 Nyquist 图

由图 9 可知,在此设备参数下,设备在右半 S

平面极点个数 $N=0$,极坐标频率特性曲线包围 $(-1, j0)$ 点的圈数 $P=0$,闭环系统在 S 右半平面的极点个数 $Z=P-2N=0$,系统稳定,与 Bode 稳定判据分析结果一致。

3.6 RT-LAB 控制器在环试验验证

为了进一步验证前述理论分析的正确性,在试验室基于实时数字仿真试验平台 (RT-LAB) 搭建了储能变流器控制器在环试验平台,分析储能变流器单机并网系统运行特性。储能变流器控制器电路板实物如图 10 所示。



图10 储能变流器控制器电路板

RT-LAB 控制器在环半实物试验平台由硬件实物和数字仿真模型两部分组成。储能变流器控制器通过 I/O 接口与仿真机进行数字、模拟量的交互。电磁暂态模型为储能变流器单机并网系统,包括模拟的储能变流器其他部件、大电网。试验平台结构如图 11 所示。

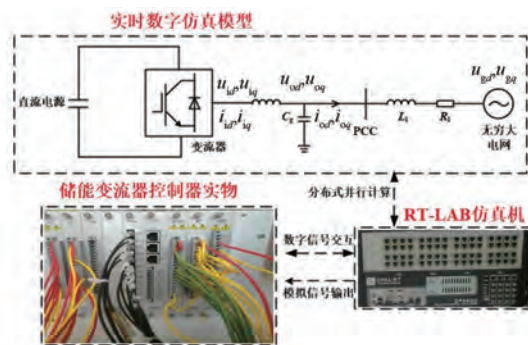


图11 RT-LAB 硬件在环试验平台结构

保持 $K_{\text{pwm}}=0.866$, $k_p=1.23$, $R=0.01 \Omega$, $L=1 \text{ mH}$ 不变, k_i 分别为 8.2、12.3 和 18.2,在 2 s 投入 150 kVar 容性负荷。图 12 是储能变流器半实物仿真波形。

由图 12 可知,储能变流器无功调压稳定时间由 180.3 ms 先减少至 170.9 ms,再增大至

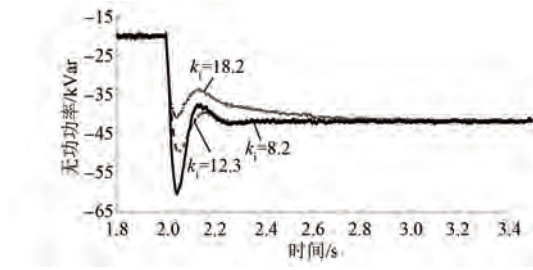


图 12 储能变流器半实物试验波形

435.2 ms。根据本文的参数优化设计方法,设置不同的积分系数,储能变流器满足稳态运行要求,与稳定性分析结果一致。特别地,当积分系数过小,储能变流器小扰动下超调量较大,当积分系数过大,储能变流器动态响应速度较慢。

4 储能变流器谐波谐振抑制策略及验证

储能变流器滤波电路可以较好地滤除变流器输出的高次电流谐波,目前常用的是 LCL 构成的三阶滤波方式,但是其本身存在谐振问题,如果设计的滤波器谐振频率较低或多机并联情况下,系统很可能会发生谐振现象,导致系统不稳定。以典型的单相 LCL 滤波电路分析,网侧电流由逆变器侧电压和电网电压两个变量决定,若把电网电压当作系统的干扰量,则可得滤波器的输入电压到输出电流的传递函数,其表达式为

$$G_{LCL}(s) = \frac{I_g(s)}{V(s)} = \frac{1}{s^3 L_1 (L_1 + L_g) C + s(L_1 + L_1 + L_g)} \quad (7)$$

式中: I_g 为输出电流; V 为输出电压; L_1 为机侧滤波电感; L_g 为网侧滤波电感; C 为滤波电容。

LCL 的谐振频率 ω_r 为

$$\omega_r = \sqrt{\frac{1}{(L_1 // [L_2 + L_g]) C}} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2 + L_g}{L_1 (L_2 + L_g) C}} \quad (8)$$

根据式(8)可知,在 MATLAB 中可画出 LCL 滤波器传递函数对应的 Bode 图,如图 13 所示。

由图 13 可知,频率响应在谐振频率处存在谐振尖峰,同时相位发生 -180° 跳变,从控制角度讲,这个 -180° 跳变为一次负穿越,会产生一对右半平

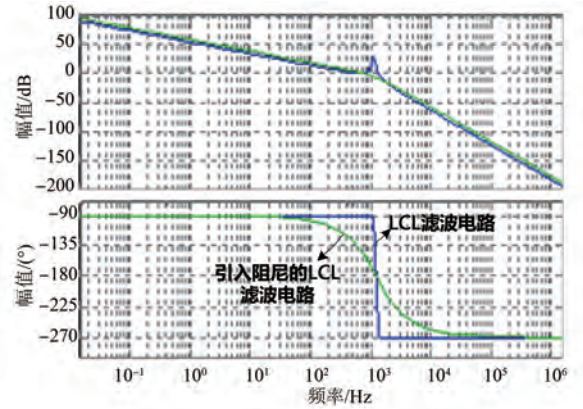


图 13 LCL 滤波电路的频率特性

面的闭环极点,导致变流器不稳定。

为消除谐波谐振对电力系统安全运行的影响,本文提出基于电容电流反馈的有源阻尼谐振抑制策略。根据式(7),引起系统不稳定的原因是 LCL 传递函数的分母缺少 s^2 项,引入该项可有效抑制系统谐振峰值。根据 LCL 滤波器的电容电流和网侧电流关系,叠加电容电流作为有源阻尼的反馈变量,可得变流器端口电压与网侧电流、电容电流的关系式:

$$G_1(s) = \frac{I_g(s)}{V(s)} = \frac{1}{s^3 L_1 C (L_2 + L_g) + s^2 (L_2 + L_g) C + s(L_2 + L_g)} \quad (9)$$

为了对 LCL 滤波器的阻尼进行调制,电容电流反馈量乘以比例调节系数,同变流器调制电压相加,则可得控制对象的传递函数:

$$G_2(s) = \frac{I_g(s)}{V(s)} = \frac{1}{s^3 L_1 C (L_2 + L_g) + s^2 K_d (L_2 + L_g) C + s(L_2 + L_g)} \quad (10)$$

根据式(10),得到 Bode 图,如图 14 所示。由图 14 可知,LCL 回路加入阻尼之后,随着电容电流比例调节系数 K_d 的增加,对于谐振峰值的抑制效果逐渐增强,且引入阻尼后,不仅有效地抑制了谐振尖峰,同时还保留了 LCL 滤波器在低频段和高频段的幅频特性。

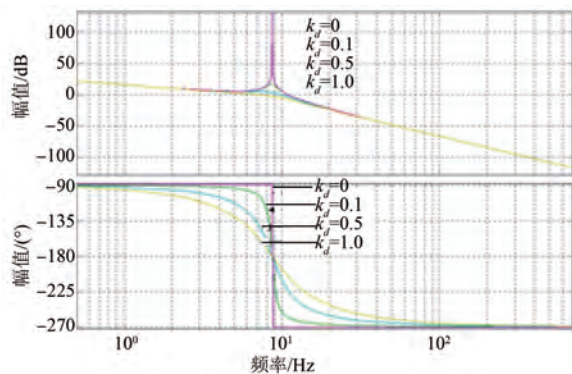


图 14 不同微分系数下的 Bode 图

5 结 语

本文立足于支撑高比例新能源新型电力系统发展需求,对储能变流器关键运行控制技术特别是电流控制模式下的控制策略进行了研究。

(1) 研究既适用于高功率支撑能力,又具备快速动态响应能力的储能变流器拓扑结构、电流内环控制策略及特征参数设计技术,特别是对电流内环 PI 控制器比例积分关键控制参数提出了优化设计方法。

(2) 面向工程应用,考虑开环幅相频率特性和开环对数频率特性方法,构建计及储能变流器电流内环的开环频域模型。

(3) 通过 Bode 图,定量分析了不同电流内环比例系数、积分参数以及变流器阻感参数变化对储能变流器控制稳定性的影响,并采用 Nyquist 稳定判据对比验证,在半实物试验平台开展储能变流器并网测试,结果表明不同积分系数下并网系统均保持稳定。

(4) 基于滤波器的输入电压到输出电流的传递函数,发现储能变流器存在谐波谐振问题,提出了基于电容电流反馈的有源阻尼谐振抑制策略,有效消除了谐波谐振的影响。分析结果表明,最佳阻尼比设计的变流器控制参数,阻感元器件参数对储能变流器稳定性基本不会造成影响;在合理的阻感元器件参数下,比例系数、积分系数大范围变化,对储能变流器动态响应特性产生一定影响,提出基于电容电流反馈的有源阻尼谐振抑制策略能够有效地消除谐波谐振,为大型新能源电站的建设提供有力支撑。

【参考文献】

- [1] 和萍,宫智杰,靳浩然,等.高比例可再生能源电力系统调峰问题综述[J].电力建设,2022,43(11): 108.
- [2] 袁小明,程时杰,文劲宇.储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J].电力系统自动化,2013,37(1): 14.
- [3] 巩宇,王阳,李智,等.光伏虚拟同步发电机工程应用效果分析及优化[J].电力系统自动化,2018,42(9): 149.
- [4] 陈浩,贾燕冰,郑晋,等.规模化储能调频辅助服务市场机制及调度策略研究[J].电网技术,2019,43(10): 3606.
- [5] 孙玉树,唐西胜,孙晓哲,等.风电波动平抑的储能容量配置方法研究[J].中国电机工程学报,2017,37(增1): 88.
- [6] 李欣然,黄际元,陈远扬,等.大规模储能电源参与电网调频研究综述[J].电力系统保护与控制,2016,44(7): 145.
- [7] 丁捷.电力储能经济性分析与综合评价方法研究[D].北京:中国科学院大学,2020.
- [8] 陶以彬,殷实,李官军,等.直挂式储能变流器参数设计及控制技术研究[J].电力电子技术,2022,56(1): 35.
- [9] 张中华,李智,宋鹏,等.LC型储能虚拟同步发电机谐波谐振机理与抑制策略研究[J].可再生能源,2018,36(12): 1842.
- [10] 桑顺,高宁,蔡旭,等.电池储能变换器弱电网运行控制与稳定性研究[J].中国电机工程学报,2017,37(1): 54.
- [11] 苗福丰,唐西胜,齐智平.储能参与风电一次调频的容量优化[J].电工电能新技术,2016,35(4): 23.
- [12] 徐明,李相俊,贾学翠,等.规模化电池储能系统的无功功率控制策略研究[J].可再生能源,2013,31(7): 81.
- [13] 沈攀.多变流器微网在非线性负载及复杂电网工况下的控制策略研究[D].成都:电子科技大学,2016.
- [14] TORRES M, LOPES L A C. Virtual synchronous generators: a control strategy to improve dynamic frequency control in autonomous power systems[J]. Energy and Power Engineering,2013,5(2A): 32.
- [15] 吕佃顺,许洪华.并网型中压变流器高频谐振抑制策略[J].电力系统自动化,2017,41(23): 123.

(下转第 34 页)

响应速度,这是 MPTC 的优点,但所提算法仍保持着与稳态时类似的转矩控制效果,转矩脉动更小。

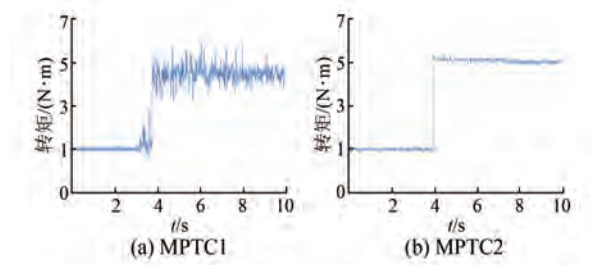


图9 动态性能对比图

4 结 语

本文针对双矢量 MPTC 的不足,提出基于 VVV 的改进算法。该方法通过增加作用的电压矢量个数,扩大算法的调制范围,降低了转矩脉动,提高了稳态性能;由于采用了 VVV,该方法减小了谐波电流;该算法采用无权重因子的代价函数进行筛选,降低了算法的复杂性。试验结果表明,所提算法的谐波含量少、转矩脉动小,还具有较好的动稳态性能。

【参 考 文 献】

[1] CERVONE A, SLUNJSKI M, LEVI E, et al. Optimal third-harmonic current injection for asymmetrical multiphase permanent magnet synchronous machines [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(4): 2772.

[2] DURAN M J, GONZALEZ-PRIETO I, BARRERO F, et al. A simple braking method for six-phase induction motor drives with unidirectional power flow in the base-speed region [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(8): 6032.

[3] NAIR S V, HARIKRISHNAN P, HATUA K. Six-step operation of a symmetric dual three-phase PMSM with minimal circulating currents for extended speed range in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(8): 7651.

[4] 王帅,解伟,林晓刚,等. 基于矢量控制的定子笼型十二相感应电机极对数切换策略[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(8): 1.

[5] 马祖阳,王晓臻,林晓刚,等. 直驱式永磁同步电机改进型无差拍直接转矩控制研究[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(8): 14.

[6] 曹晓冬,徐晴,赵双双,等. 高效能同步磁阻电机数据驱动型模型预测控制方法[J]. 电机与控制应用, 2022, 49(5): 14.

[7] 耿强,巨永龙,周湛清. 五桥臂双永磁同步电机系统优化模型预测控制[J]. 电机与控制应用, 2019, 46(4): 8.

[8] NIKZAD M R, ASAEI B, AHMADI S O. Discrete duty-cycle-control method for direct torque control of induction motor drives with model predictive solution [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(3): 2317.

[9] LUO Y, LIU C. Model predictive control for a six-phase PMSM motor with a reduced-dimension cost function [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(2): 969.

[10] ZHANG Y, YANG H. Model predictive torque control with duty ratio optimization for two-level inverter-fed induction motor drive [J]. 2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2013.

[11] 刘述喜,孙超俊,杜文睿,等. 改进的永磁同步电机双矢量模型预测转矩控制[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(6): 30.

[12] CHEN W, ZENG S, ZHANG G, et al. A modified double vectors model predictive torque control of permanent magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 11419.

[13] ZHAO Y, LIPO T A. Space vector PWM control of dual three phase induction machine using vector space decomposition [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1995, 31(5): 1100.

[14] 张永昌,夏波,杨海涛. 感应电机三矢量模型预测磁链控制[J]. 电气工程学报, 2017, 12(3): 1.

(上接第 28 页)

[16] 李智,张中华,刘辉,等. LCL 型储能虚拟同步发电机谐波谐振特性分析与抑制策略[J]. 太阳能学报, 2020, 41(10): 101.

[17] 付勋波,董志然,樊晓磊,等. 光储独立微电网全电压复合控制技术研究[J]. 可再生能源, 2016, 34(12): 1779.