

基于自适应阻抗的构网型储能变流器控制策略研究

崔 杰¹, 李国庆², 武立国¹, 杨政厚¹, 左希礼³, 姜自国⁴, 朱耿峰⁵

(1. 北京华能新锐控制技术有限公司, 北京 102209; 2. 华能新能源股份有限公司, 北京 100036; 3. 华能会理风力发电有限公司, 四川 会理 615100; 4. 华能昭觉风力发电有限公司, 四川 昭觉 616153; 5. 格尔木时代新能源发电有限公司, 青海 格尔木 816000)

摘要: 构网型储能变流器因具备调频调峰、削峰填谷及提高电力系统支撑等能力, 已成为构建新型电力系统的重要设备之一。围绕构网型储能变流器接入电网时的稳定性展开研究。首先建立了构网型储能变流器接入电网时的数学模型, 分析了在不同阻抗特性下对并网稳定性的影响。研究结果表明构网型储能变流器采用传统虚拟同步控制, 当输出阻抗发生变化以及并离网切换时, 容易引起系统振荡, 不利于实现无缝切换。针对上述问题在传统虚拟同步控制的基础上加入了自适应阻抗控制, 通过仿真验证, 该控制策略可以实现不同电网工况下的阻抗适配以及并离网的无缝切换, 有效提升了并网系统的稳定性。

关键词: 构网型储能变流器; 自适应阻抗; 虚拟同步控制; 无缝切换

Research on control strategy of grid-forming power conversion system based on adaptive impedance

CUI Jie¹, LI Guoqing², WU Liguang¹, YANG Zhenghou¹, ZUO Xili³, JIANG Ziguang⁴, ZHU Gengfeng⁵

(1.Beijing Huaneng Xinrui Control Technology Co., Ltd., Beijing 102209, China; 2.Huaneng Renewables Co., Ltd., Beijing 100036, China; 3.Huaneng Huili Wind Power Generation Co., Ltd., Huili 615100, China; 4.Huaneng Zhaojue Wind Power Generation Co., Ltd., Zhaojue 616153, China; 5.Golmud Era New Energy Power Generation Co., Ltd., Golmud 816000, China)

Abstract: The grid-forming power conversion system has become one of the important equipment for constructing a new type of power system due to its ability to regulate frequency and shave peak, shift peak load, and improve power system support. This article studies the stability of grid-forming power conversion system when connected to the grid. Firstly, a mathematical model for grid-forming power conversion system was established, and the impact on grid stability under different impedance characteristics was analyzed. The research results indicate that when the grid-forming power conversion system adopts traditional virtual synchronous control, it is easy to cause system oscillation when the output impedance changes and connected/off grid, which is not conducive to achieving seamless switching. In response to the above issues, this article adds adaptive impedance control on the basis of traditional virtual synchronous control. Through simulation verification, this control strategy can achieve impedance adaptation under different grid conditions and seamless switching between connected/off grid, effectively improving the stability of grid connected systems.

Keywords: grid-forming power conversion system; adaptive impedance; virtual synchronization control; seamless switching

中国华能集团有限公司科技项目 (HNKJ23-H57)

0 引言

新能源的大规模接入挤占了常规机组的开机空间,导致系统惯量降低、调频能力下降、无功支撑能力不足和宽频振荡等问题相继出现,电力系统存在崩溃以及大面积停电的风险^[1-2]。储能系统与大规模风光相结合,不仅可以有效提高可再生能源的利用率,还可以进行调频调峰、平抑电网波动等,对提高电力系统的可靠性和经济性等具有重要作用。

储能变流器是储能系统的核心能量转换装备,是连接储能电池、电网以及负荷的双向可控转换装置。目前跟网型储能控制所依赖的锁相环技术虽然相对成熟,但仍需要电网提供稳定的频率和电压参考值才能正常工作,并且自身控制环路的稳定性要弱于构网型储能,无法起到主动支撑系统的作用。而构网型储能控制不依赖电网频率和相位测量即可实现同步,在弱电网中对频率和电压的调节更加灵活,可以快速建立支撑电网稳定运行的电压源,起到调频调压、增加系统惯量和抑制宽频振荡等作用,有利于增强电力系统的稳定性^[3-4]。

目前研究较多的自同步构网控制技术有下垂控制和虚拟同步控制、匹配控制和虚拟振荡器控制等。下垂控制一般通过 $P-\omega$ 下垂曲线来响应系统中的频率或功率变化量^[5-6]。但是下垂控制无法对系统中频率的变化率进行直接响应。虚拟同步控制与下垂控制类似,都是以输出功率作为控制对象,它可通过控制手段模拟同步机的一次调频、惯量支撑和电压调节等功能,对系统进行电压和频率的支撑^[7-8]。由于下垂控制和虚拟同步控制都是基于输出功率的自同步控制方式,因此其前提是需要有相对稳定的直流电压。与虚拟同步控制不同,匹配控制利用直流电容电压代替同步机中转子作用,进而实现功率和电压同步。匹配控制的优点在于其直流电压可控,但有所欠缺的是其值不恒定,且该控制策略需要足够的直流电容容量^[9]。与下垂控制和虚拟同步控制相比,虚拟振荡器控制具备更快的响应速度,但是从大电网主动支撑功能角度来看,较难实现惯量支

撑能力。此外,其参考电压的生成机制比较复杂,因此在实际新能源并网工程中的应用很少^[10]。

虚拟同步控制可有效提高电力系统惯量水平,但阻尼与虚拟惯量的引入也使得虚拟同步控制的动态调节过程存在超调与振荡,影响了系统的电能质量,严重时还会威胁系统的安全稳定运行^[11-12]。此外,构网型储能变流器对于新能源场站阻抗特性、系统谐振频率等有直接的影响,增加了系统的不稳定因素^[13-14]。针对上述问题,有学者提出了自适应控制方法,如自适应模式切换、自适应虚拟阻抗控制等^[15-16],以提高构网型储能变流器各种工况下的稳定特性。本文将在虚拟同步控制的基础上对构网型储能变流器的控制策略进行优化,提出了自适应阻抗的虚拟同步控制策略,允许自适应调整变流器的有功和无功输出,以实现暂态稳定性的提升,有效改善储能变流器并网运行以及切换时的性能,避免动态调节过程出现超调与振荡等问题,有效提高对电力系统的支撑能力。

1 储能变流器结构形式

1.1 储能变流器拓扑结构

储能变流器的拓扑结构包括单级式、双级式和级联式等。其中单级式一般用于低压集中式储能,双级式一般适用于超级电容、液流电池等直流电压变化范围较宽的储能系统,级联式一般应用于高压直挂式储能,需要根据具体的应用场景选择合适的拓扑结构。本文所提到的储能变流器功率单元采用单级式三相两电平结构,滤波回路采用 LC 滤波器。图1为三相单级式储能变流器的基本电路,此拓扑已被广泛应用于从千瓦到兆瓦级的功率变换领域。

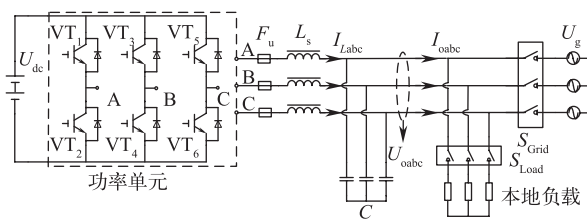


图1 三相单级式储能变流器基本电路

Fig. 1 Basic circuit of three-phase single-stage power conversion system

1.2 储能变流器数学模型

根据图1可得到储能变流器在 dq 坐标系下的数学表达式为

$$\begin{cases} u_d = \omega_0 L_s I_{Lq} + L_s \frac{di_{Ld}}{dt} + R_s i_{Ld} + u_{od} \\ u_q = -\omega_0 L_s I_{Ld} + L_s \frac{di_{Lq}}{dt} + R_s i_{Lq} + u_{oq} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} i_{Ld} = \omega_0 u_{oq} + C_s \frac{du_{od}}{dt} + i_{od} \\ i_{Lq} = -\omega_0 u_{od} + C_s \frac{du_{oq}}{dt} + i_{oq} \end{cases} \quad (2)$$

式中, u_d 、 u_q 为并网电压的 dq 轴分量; L_s 为滤波电感; C_s 为滤波电容; R_s 为电感内阻; i_{Ld} 、 i_{Lq} 为滤波电感电流的 dq 轴分量; u_{od} 、 u_{oq} 为电容电压的 dq 轴分量; i_{od} 、 i_{oq} 为负载电流的 dq 轴分量。

根据上述表达式可以得到 dq 坐标系下储能变流器的数学模型, 如图2所示。

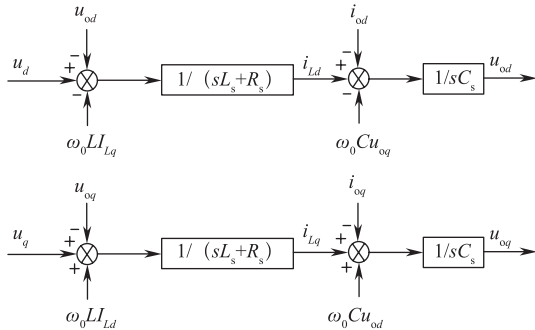


图2 储能变流器数学模型

Fig. 2 Mathematical model of power conversion system

2 储能变流器构网控制策略

构网控制技术的基本原理是: 通过变流器经过阻抗向系统并网点提供一个具有一定支撑能力的电压源。其本质上是功率同步的过程, 能够自适应电网强度, 实现等效惯量和系统强度的支撑。

2.1 虚拟同步控制

恒压恒频控制 (VF控制) 是电压源型变流器控制的基础, 也是虚拟同步控制的重要组成部分, VF控制结构如图3所示。

电压电流双环控制的基本原理是: 电网电

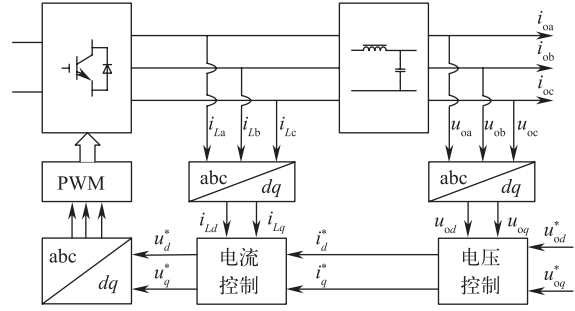


图3 VF控制框图

Fig. 3 VF control block diagram

压指令值 u_{od}^* 和 u_{oq}^* 分别与电网电压实际值 u_{od} 和 u_{oq} 进行比较, 其偏差经过PI调节器产生电流环所需的电流指令值 i_d^* 和 i_q^* , 电流指令值与电流实际值进行比较, 其偏差经过PI调节器产生调制波, 调制波与载波进行比较后产生相应的IGBT驱动信号。VF控制所需要的电压指令值和相角需要根据脱网前电网电压的幅值和相角进行设定, 表达式为

$$\begin{cases} U_{\text{ref}} = \sqrt{U_{od}^2 + U_{oq}^2} \\ \theta_{\text{ref}} = \frac{1}{s} \left(k_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right) \frac{V}{2} (\theta - \theta') \right) \end{cases} \quad (3)$$

式中, V 为电网相电压幅值; θ 为电网相位; θ' 为锁相环相位; T_i 为环路滤波器时间常数; k_p 为比例系数。

虚拟同步控制技术是在恒压恒频控制的基础上, 通过模拟同步发电机机械和电磁部分, 使变流器具备同步发电机的惯性阻尼特征, 实现方式为

$$\begin{cases} U_{\text{ref}} = U_0 + K_q (Q_{\text{ref}} - Q) \\ \theta_{\text{ref}} = \frac{1}{s} \left(\omega_0 + \frac{1}{Js + D} (P_{\text{ref}} - P) \right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, K_q 为比例系数; J 为虚拟转动惯量; D 为阻尼系数, 表示单位频率变化对应的有功功率调整值。

虚拟同步控制有功功率-频率调节部分产生恒压恒频控制所需要的电压相位, 无功功率-电压调节部分产生恒压恒频控制所需的电压幅值^[17]。对比式 (3) 和式 (4) 可以发现, VF控制依赖于电网电压检测以及锁相环技术, 而虚拟同步控

制无需电网频率和相位测量即可实现同步。虚拟同步控制的控制框图如图4所示。

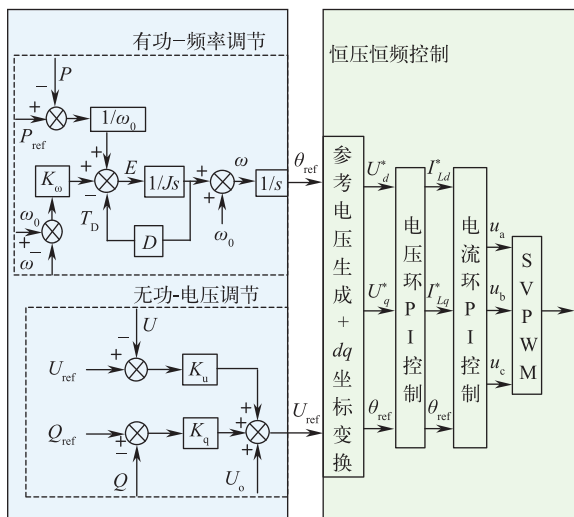


图4 虚拟同步控制框图

Fig. 4 Virtual synchronization control block diagram

2.2 基于自适应阻抗的虚拟同步控制

(1) 阻抗特性分析

图5为储能变流器接入电网的系统结构，储能变流器采用LC滤波器。其中 L_s 、 C_s 分别为储能变流器的滤波电感和滤波电容， C_g 为电网侧等效电容， L_g 为电网侧等效电感， Z_L 为本地负载。图6为储能系统接入电网时阻抗的等效数学模型^[18]。

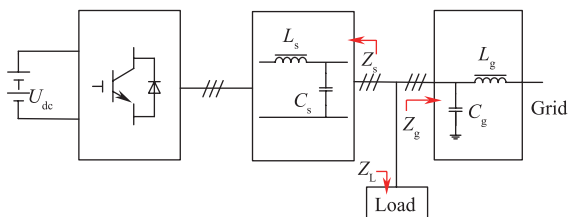


图5 储能变流器并网结构图

Fig. 5 Grid connected structure diagram of power conversion system

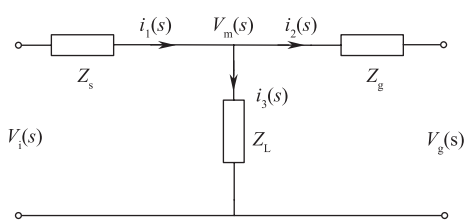


图6 阻抗等效图

Fig. 6 Impedance equivalent diagram

根据图6可得到并网电流与输入电压的传递函数为

$$\frac{i_2(s)}{V_i(s)} = \frac{R}{s^3 L_s L_g R C + s^2 L_s L_g + s R L} \quad (5)$$

式中， $C=C_s+C_g$ ； $L=L_s+L_g$ ； $Z_L=R$ 。

图7为不同 Z_L 时的阻抗频域特性。从图7中可以看出，随着 R 值的增大，系统发生谐振的概率越大。图8为不同 C_g 时的阻抗频域特性。从图8中可以看出， C_g 越小，谐振频率越大； C_g 越大，谐振频率越小。可见当系统阻抗发生变化时，谐振频率会发生偏移，容易引起系统的振荡失控，对变流器控制的频带宽度、稳定裕度等提出了更高的要求。

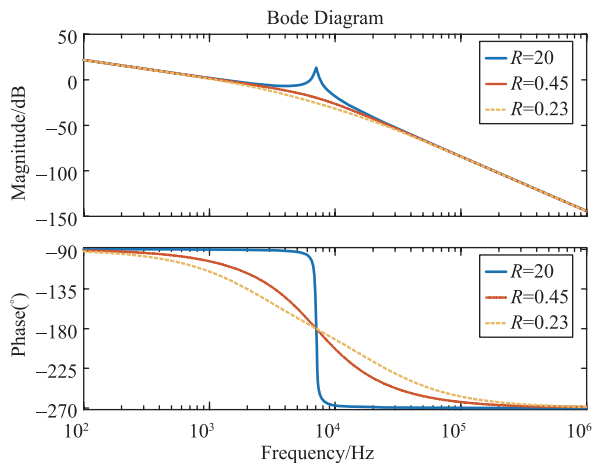


图7 不同 Z_L 时的伯德图

Fig. 7 Bode plots at different Z_L values

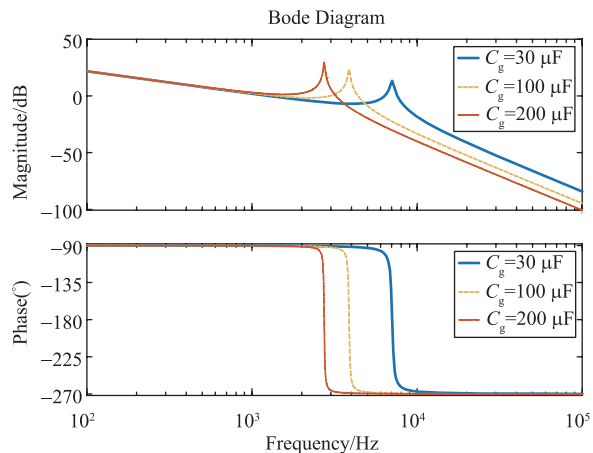


图8 不同 Z_g 时的伯德图

Fig. 8 Bode plots at different Z_g values

(2) 自适应阻抗控制

根据前文分析,不同负载情况下系统的阻抗特性表现不同。当负载发生突变时,系统可能存在振荡风险。本文提出了一种自适应阻抗的控制思路,即在储能变流器输出阻抗侧引入自适应阻抗,通过自适应阻抗调控构网型储能变流器的阻尼特性,以达到提升并网系统稳定性的目的。具体实现方法是:变流器输出阻抗侧与自适应阻抗调节器并联,通过调整自适应阻抗值以调节系统阻抗特性,进而控制变流器的输出。图9为基于自适应阻抗控制的电压电流双环控制框图, $G_f(s)$ 为自适应阻抗调节器,表达式为

$$G_f(s) = \frac{sC_e}{s^2L_eC_e + sR_eC_e + 1} \quad (6)$$

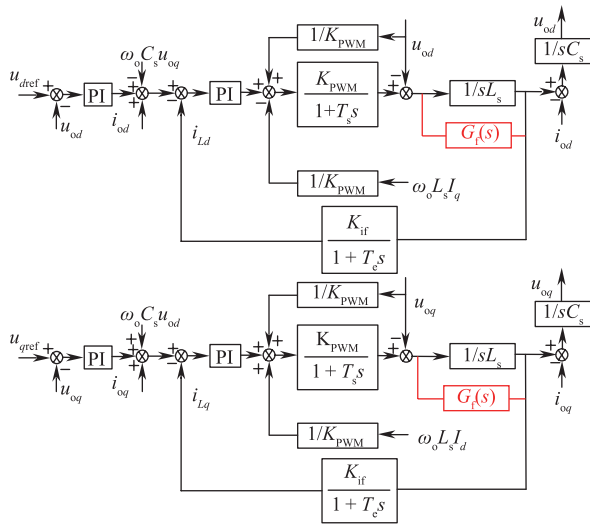


图9 加入自适应阻抗控制的双环控制框图

Fig. 9 Double loop control block diagram with adaptive impedance control

式中, L_e 、 C_e 、 R_e 分别为自适应阻抗的电感、电容和电阻分量; K_{PWM} 为变流器等效增益; T_s 为开关周期; T_e 为采样周期; K_{if} 为采样系数。

加入自适应阻抗调节器之后,并网电流与输入电压的传递函数如式(7)所示。加入自适应阻抗适配器前后的电流环开环传递函数的表达式分别如式(8)和式(9)所示。

$$\frac{i_{2e}(s)}{V_{ic}(s)} = \frac{sL_s R G_f(s) + R}{s^3 L_s L_g R C + s^2 L_s L_g + s^2 R L_s L_g G_f(s) + s R (L_s + L_g)} \quad (7)$$

$$G_{iopen} = \frac{K_{PWM}}{1 + T_s s} \cdot \frac{1}{sL_s} \cdot \frac{K_{if}}{1 + T_e s} \quad (8)$$

$$G_{fiopen} = \frac{K_{PWM}}{1 + T_s s} \cdot \frac{sL_s G_f(s) + 1}{sL_s} \cdot \frac{K_{if}}{1 + T_e s} \quad (9)$$

图10为加入自适应阻抗调节器前后电流环的开环频域特性。从图10中可以看出,加入自适应阻抗调节器之前,控制系统的相位裕度要明显低于加入自适应阻抗调节器后控制系统的相位裕度,相位裕度的提升,可以有效改善系统的稳定性。与此同时,基于自适应阻抗的虚拟同步控制具备多类型系统阻抗的调节能力,降低了控制参数的排斥性和复杂程度,提高了控制系统的适配性。

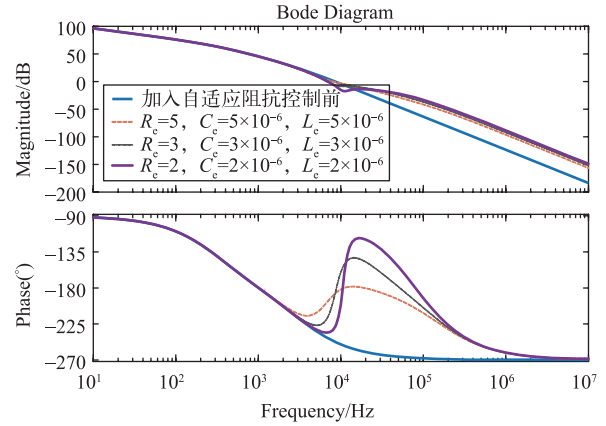


图10 加入自适应阻抗控制前后电流环开环频域特性

Fig. 10 Open-loop frequency domain characteristics of the current loop before and after adding adaptive impedance control

(3) 自适应阻抗调节方法

自适应阻抗调节的基本流程如图11所示。

当并网系统稳定时,不对自适应阻抗幅值进行调节,默认自适应阻抗值为无穷大。当储能变流器与电网发生谐振或者功率需求出现阶跃变化时,并网电压电流将含有大量的谐振分量。通过检测系统振荡信息,提取电压电流谐振分量,并与振荡电压电流的限值作对比,对阻抗进行自适应调整,使阻抗交越频率远离风险频段。与传统虚拟同步控制相比,基于自适应阻抗的虚拟同步控制可以根据当前工况自主调节适配阻抗,为电网提供快速的暂态稳定支撑能力,大大提高了电力

系统的稳定裕度。

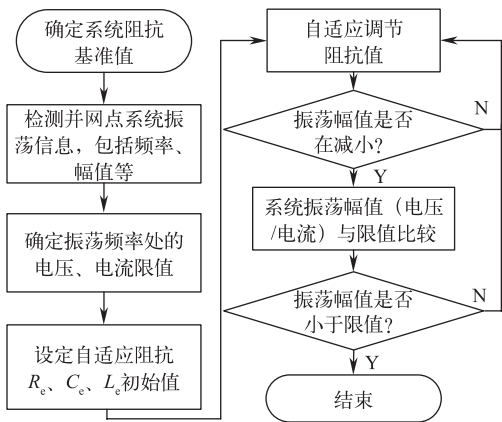


图 11 自适应阻抗调节流程图

Fig. 11 Adaptive impedance adjustment flowchart

3 仿真分析

本文利用MATLAB/Simulink搭建了储能变流器并网仿真模型，仿真参数见下表。

表 仿真参数

Tab. Simulation parameters

项目	参数	项目	参数
仿真步长 / μs	1	变流器滤波电感 / μH	110
仿真时长 /s	1.5	变流器滤波电容 / μF	415
直流电压 /V	800	电网侧等效电感 / μH	20
交流电压 /V	380	电网侧等效电容 / μF	200
额定功率 /kW	630	本地负载（工况 1） /kW	0
交流额定电流 /A	957	本地负载（工况 2） /kW	330
开关频率 /kHz	2	本地负载（工况 3） /kW	630
传统虚拟同步控制参数（并网）	$K_o=1\times 10^6$ $K_u=1\times 10^{-5}$ $K_q=2\times 10^{-4}$ $J=0.01$ $D=20$	自适应阻抗虚拟同步控制参数	$K_o=1\times 10^6$ $K_u=1\times 10^{-4}$ $K_q=2\times 10^{-4}$ $J=1.25\times 10^{-4}$ $D=25$
传统虚拟同步控制参数（离网）	$K_o=1\times 10^4$ $K_u=1\times 10^{-5}$ $K_q=2\times 10^{-4}$ $J=0.5$ $D=20$		

采用传统构网型控制策略时，并网和离网状态下所采用的控制参数会有所偏差，两种工作模式需要不同的控制参数适配，且并网离网切换时刻以及负载发生变化时容易出现谐振、功率倒灌等

问题，严重威胁电气设备安全。是以本地负载为半载时的工况为例，在加入自适应阻抗控制之前的仿真波形如图12所示。通过仿真可以看出，离网转并网时储能变流器发生了功率倒灌问题，功率直接由+330 kW突变至-1 100 kW左右，同时交流电流峰值由709 A上升至2 500 A，倒灌功率和交流电流已超出储能变流器的容量范围，严重威胁变流器自身运行安全。

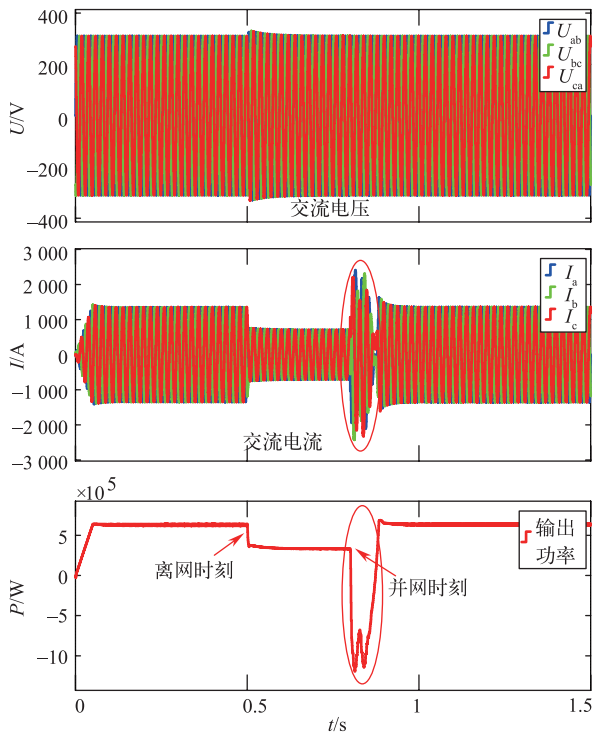


图 12 加入自适应控制前

Fig. 12 Before adding adaptive impedance control

图13~图15为加入自适应阻抗控制之后，本地负载分别为空载、半载以及满载时的仿真波形。其中，0.5 s处为并网转离网时刻，0.8 s处为离网转并网时刻。根据图可以看出，加入自适应阻抗控制之后，储能变流器在本地负载为0 kW、330 kW以及630 kW的情况下，由离网状态转变为并网状态时均能够实现工作模式的平滑切换，切换过程无振荡、功率倒灌和过电流等现象，而且并网状态和离网状态所采用的控制参数相同，不仅有效保证了变流器的安全运行，而且降低了控制参数调节的复杂程度，可以大大提高电力系统的支撑能力和稳定性。

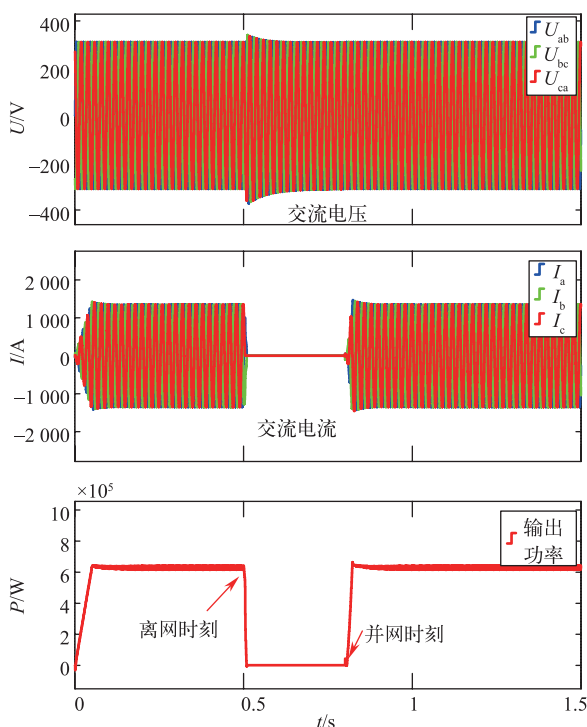


图 13 加入自适应阻抗控制之后的空载工况

Fig. 13 No-load condition after adding adaptive impedance control

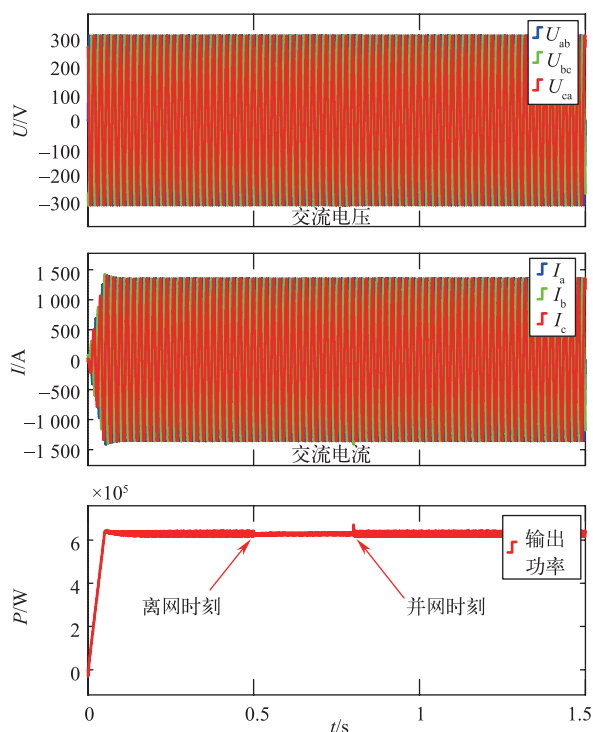


图 15 加入自适应阻抗控制之后的满载工况

Fig. 15 Full load condition after adding adaptive impedance control

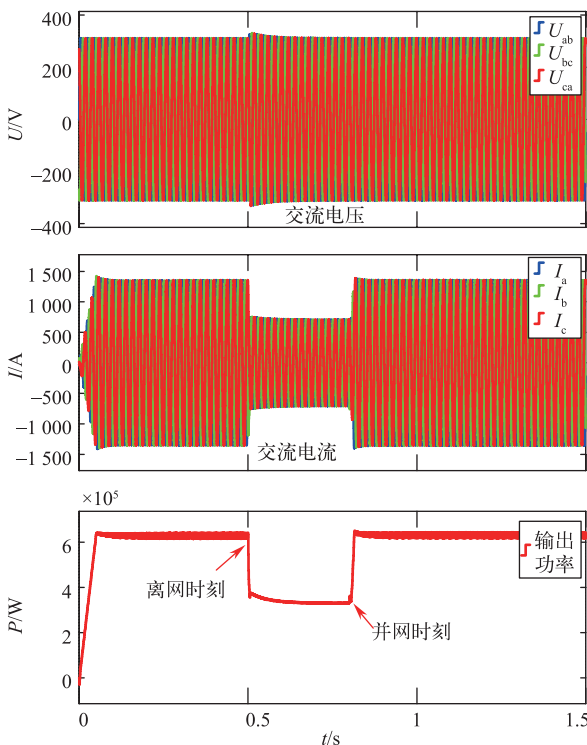


图 14 加入自适应阻抗控制之后的半载工况

Fig. 14 Half load condition after adding adaptive impedance control

4 结束语

本文建立了构网型储能变流器阻抗模型，分析了输出阻抗对储能变流器并网稳定性的影响。通过仿真对比分析发现，加入自适应阻抗控制后的虚拟同步控制，可以实现储能变流器并离网模式的无缝切换，有效抑制负载变化以及并离网切换时出现的系统谐振、功率倒灌和硬件过电流等问题，提高了储能变流器的安全运行能力，降低了控制参数调节的复杂程度，有效提升了弱电网下电力系统的支撑能力和稳定性。通过本文的研究可以为未来构网型储能系统的深入探究以及新型电力系统的建设提供一定的技术支撑与经验积累。

参考文献

- [1] 王伟胜, 李光辉, 何国庆, 等. 面向新型电力系统的新能源并网控制挑战与展望[J]. 新型电力系统, 2023, 1(2): 145-160.
- [2] 詹长江, 吴恒, 王雄飞, 等. 构网型变流器稳

- 定性研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(6): 2339-2359.
- [3] 李建林, 丁子洋, 游洪灏, 等. 构网型储能支撑新型电力系统稳定运行研究[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 1-11.
- [4] 雷雨, 李光辉, 王伟胜, 等. 跟网型和构网型新能源并网控制阻抗对比与振荡机理分析[J/OL]. 中国电机工程报, 1-15[2024-06-29].
- [5] 许诒翊, 刘威, 刘树, 等. 电力系统变流器构网控制技术的现状与发展趋势[J]. 电网技术, 2022, 46(9): 3586-3595.
- [6] 何丰钰, 陈兰杭, 李先允, 等. 基于下垂控制的构网型变流器电压控制策略[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(2): 5-10.
- [7] 石荣亮, 张兴, 徐海珍, 等. 基于虚拟同步发电机的微网运行模式无缝切换控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 16-23.
- [8] 王祺, 张泽轲, 郭杰帅, 等. 新型电力系统主动构网机理与技术路径[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(2): 504-517.
- [9] 李建林, 丁子洋, 刘海涛, 等. 构网型储能变流器及控制策略研究[J]. 发电技术, 2022, 43(5): 679-686.
- [10] 史亚帆, 许寅, 吴翔宇, 等. 面向构网逆变器的虚拟振荡器控制技术: 统一设计框架与关键问题探讨[J]. 电网技术, 2024, 48(6): 2251-2261.
- [11] 赵炳洋, 赵波, 胡娟, 等. 考虑VSG构网储能暂态与稳态优化的自适应策略[J]. 高压电器, 2023, 59(7): 39-47.
- [12] 黄萌, 凌扬坚, 耿华, 等. 功率同步控制的构网型变流器多机交互分析与稳定控制研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(11): 4571-4583.
- [13] 熊小玲, 李昕悦, 周琰, 等. 基于陷波器的构网型换流器同步频率谐振抑制策略[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3827-3839.
- [14] 郭小龙, 杨桂兴, 张彦军, 等. 构网型储能变流器并网系统SISO环路增益建模与重塑控制[J]. 电气技术, 2023, 24(2): 24-31, 51.
- [15] 贾科, 刘芸, 毕天姝, 等. 基于自适应虚拟阻抗的构网型新能源电源不对称故障穿越控制[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-11[2024-06-29].
- [16] 徐晨航, 邹志翔, 陈武, 等. 面向暂态稳定性提升的构网型储能系统自适应控制方法[J/OL]. 电网技术, 1-13[2024-06-29].
- [17] 刘辉, 于思奇, 孙大卫, 等. 构网型变流器控制技术及原理综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-16[2024-06-29].
- [18] 吴家杰, 陈新, 张东辉, 等. 构网型储能变换器在新能源接入场景下并网稳定性分析及提升策略[J/OL]. 中国电机工程学报, 1-14[2024-06-29].
-
- ### 作者简介
- 崔杰 (1988—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子变换器以及新能源并网。
- 李国庆 (1972—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为新能源发电。
- 武立国 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力电子变换器以及新能源并网。
- 杨政厚 (1984—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为控制理论与控制工程。
- 左希礼 (1974—), 男, 硕士, 正高级工程师, 研究方向为控制理论与控制工程。
- 姜自国 (1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为新能源发电。
- 朱耿峰 (1987—), 男, 高级工程师, 研究方向为新能源发电。
- (收稿日期: 2024-11-14)