

集成有源阻尼器功能的变流器容量协调策略

张可嘉¹, 丁 琰¹, 杨 虎¹, 杨金明¹, 陈 旺²

(1. 江苏祥泰电力实业有限公司, 江苏 泰州 225300;

2. 南京工程学院 电力工程学院, 南京 211167)

摘 要: 有源阻尼器装置通过构造虚拟电阻, 可以同时解决多台变流器的谐振问题。为解决常规并网功能和有源阻尼器功能的容量协调问题, 设计基于傅里叶变换的虚拟电阻自适应控制策略, 进行有源阻尼器功能的容量调节。针对变流器的容量需求之和超过总容量限制的问题设计容量协调策略, 通过建立变流器谐振治理目标函数和额定功率约束条件, 构造拉格朗日函数求解谐振抑制权重, 实现变流器容量的协调分配。实验表明, 所提的容量协调策略能根据变流器运行需求有效分配并网功能和有源阻尼器功能的容量。

关键词: 有源阻尼器; 变流器; 容量协调; 虚拟电阻

DOI: 10.19585/j.zjdl.202501010

开放科学(资源服务)标识码(OSID): 

A capacity coordination strategy for converters integrated with active damping functionality

ZHANG Kejia¹, DING Long¹, YANG Hu¹, YANG Jinming¹, CHEN Wang²

(1. Jiangsu Xiangtai Electric Power Industry Co., Ltd., Taizhou, Jiangsu 225300, China;

2. School of Electric Power Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: The active damping device mitigates resonance among multiple converters by creating a virtual resistance. To address the capacity coordination challenge between conventional grid-connected functionality and active damping functionality, an adaptive control strategy for virtual resistance based on Fourier transform to regulate the capacity using active damping functionality. Given that the total capacity demands of converters exceed their overall capacity limit, a capacity coordination strategy is formulated. This strategy defines an objective function for resonance mitigation and imposes a constraint on rated power, leading to the development of a Lagrangian function that determines the resonance suppression weights, thereby achieving coordinated allocation of converter capacity. Experimental results demonstrate that the proposed strategy effectively distributes capacity between the grid-connected function and the active damping function in line with the operational demands of the converters.

Keywords: active damper; converter; capacity coordination; virtual resistance

0 引言

随着分布式电源、储能、电动汽车充电桩等海量电力电子装置的接入, 电网逐渐呈现高阻抗和低短路比的弱电网特征^[1-3]。电网阻抗宽范围变化使变流器与电网阻抗之间易发生谐振现象, 严重影响配电网的安全运行。

基于阻抗的分析方法, 可通过考察子系统在PCC(公共连接点)处的端口阻抗来判断整个系统

的谐振稳定性^[4-6]。基于阻抗的稳定性分析方法可以通过优化并网变流器的内部结构, 例如改进控制方法^[7-9]或者改进采样方法^[10-11], 或增加控制环路^[12-14]来为系统提供阻尼。上述谐振抑制方法已有较为深入的理论研究和工程实践, 但随着变流器接入量增大, 逐台变流器进行谐振抑制将耗费较大的人力、物力成本。

奥尔堡大学的王雄飞教授在2014年提出了有源阻尼器^[15]谐振抑制装置, 该装置可在谐振频率处模拟一个虚拟电阻与PCC处其他变流器并联, 从而优化其他变流器的输出阻抗, 提高PCC对谐振的阻尼能力。通过动态调节虚拟电阻, 改变有源阻尼器对谐振的抑制能力。文献[16]提出了一种有源阻尼器串联LC(谐振电路)滤波器抑制谐振

基金项目: 江苏省高等学校基础科学(自然科学)研究项目(22KJB470013); 江苏祥泰电力实业有限公司科技项目(XTYF23002)

的方法,可有效抑制单频率谐振。文献[17]和[18]提出了一种改善变流器稳定性的自适应有源阻尼器,明确了阻抗重塑问题,通过接入有源阻尼器,相当于接入了新的虚拟阻抗,通过该阻抗对谐振频率的阻抗参数不匹配问题进行阻抗补偿/修正,从而消除系统的谐振问题。由于一台有源阻尼器通过向PCC配置虚拟电阻抑制其他变流器的谐振,因此使用有源阻尼器解决谐振问题的成本较低。

有源阻尼器通过虚拟阻抗改善PCC处变流器群的谐振稳定性。因此,可集成到常规变流器中,有效利用两种设备的共同拓扑结构,提升硬件装置的利用效率以及稳定性^[19]。但设备的总容量有限,即有源阻尼器与设备基础并网功能共用变流器的总容量。因此,当设备容量不足时,需要合理分配设备容量。考虑到有源阻尼器的性能和容量可通过虚拟电阻取值^[20]进行动态调节,为提升谐振治理效果以及设备工作效率,有源阻尼器容量以及并网功能容量的分配权衡策略有待进一步研究。

目前容量分配策略主要应用于多变流器容量协调分配中。文献[21]提出了一种功率联动控制策略,考虑频率和直流母线电压以及交直流子电网容量,提高了孤岛模式下混合微电网的整体性能。文献[22]提出了一种多堆栈现场控制系统的优化协调方法,基于多堆栈燃料电池系统的最小能耗函数以及全局效率函数求解,用于线性控制,实现了燃料电池的功率最优分配。在多功能变流器的容量分配策略中,文献[23]提出了一种基于视在容量与“补偿比例系数”下垂特性的容量分摊控制策略。文献[24]基于层次分析法,提出了满足谐振治理指标要求的容量最优控制策略。文献[25]基于熵权的谐振治理综合评估模型,提出一种以实现并网点谐振综合指标最优为目标的优化算法,实现变流器谐振大小的灵活控制。上述容量分配策略均考虑多台变流器之间的有功、无功、谐波输出等多种功能的协调分配策略。集成有源阻尼器功能的变流器中,缺乏对有源阻尼器功能的容量定义及有效调节策略,且需要解决变流器容量无法同时满足两项容量需求的情形。

针对上述问题,本文提出了一种集成有源阻尼器功能的变流器容量协调策略。该策略首先采

用傅里叶变换筛选目标谐振分量,通过自适应虚拟电阻实现有源阻尼器容量的动态调节。其次,针对变流器剩余容量充足和不充足两种情况,制定不同的优化方法。建立谐振治理效果最优的目标函数,将变流器的额定功率作为约束条件,构造拉格朗日函数求解谐振电流补偿系数,在满足谐振治理最低要求的基础上,通过合理配置不同谐振分量的权重,以最低有源阻尼器功能容量为目标,电能质量综合指标为约束条件,构造拉格朗日函数求解谐振电流权重,使谐振含量满足允许阈值,同时具备较大的功率并网功能容量。基于上述优化方法,构建集成有源阻尼器功能的变流器容量动态分配策略。

1 集成有源阻尼器功能的变流器及虚拟电阻自适应控制

1.1 集成有源阻尼器功能的变流器

图1为集成有源阻尼器功能的变流器系统的结构与控制框图,其中 L_{1B} 、 L_{2B} 、 C_B 分别为变流器逆变侧电感、网侧电感和滤波电容, V_{dc} 为直流电压, i_B 为变流器端口电流, v_g 为电网电压, L_g 为电网阻抗。并网功能的控制结构如实线框所示,包括PR控制器 $G_{pr}(s)$ 和电容电流 i_{C_abc} 反馈环节,其中 K_c 为电容电流反馈系数, $i_{B_a\beta}$ 为采样得到的并网电流, v_{MA_abc} 为调制电压。有源阻尼器功能通过谐振筛选环节得到所需抑制的谐振波形 $v_{pccr_a\beta}$,该波形通过虚拟电阻调节器计算得到电流环谐振参考信号 $i_{href_a\beta} \propto i_{href_a\beta}$ 与 $v_{pccr_a\beta}$ 具有相同的频率和相反的相位,使谐振电压 $v_{pccr_a\beta}$ 得到有效抑制。有源阻尼器抑制谐振原理如图2所示。

图2给出了集成有源阻尼器功能的变流器等效阻抗模型,其中,并网变流器A为产生谐振的变流器,变流器B为集成有源阻尼器功能的变流器。变流器B的阻抗等效为常规功率并网阻抗 $Z_{oB_a}(s)$ 和虚拟阻抗 $Z_{VR_a}(s)$,其中:

$$Z_{VR_a}(s) = \frac{v_{pccr_a\beta}(s)}{i_{href_a\beta}(s)} \quad (1)$$

当变流器A的阻抗 $Z_{oA_a}(s)$ 与电网阻抗 $Z_{g_a}(s)$ 产生谐振,接入变流器B,并将 $Z_{VR_a}(s)$ 在谐振频率设计为一定大小的纯电阻 R_v ,从而使系统总输出阻抗变为 $Z_{oA_a}(s) // Z_{oB_a}(s) // Z_{VR_a}(s)$,可使系统稳定。此时,将虚拟电阻调节器设计为 $1/R_v$,

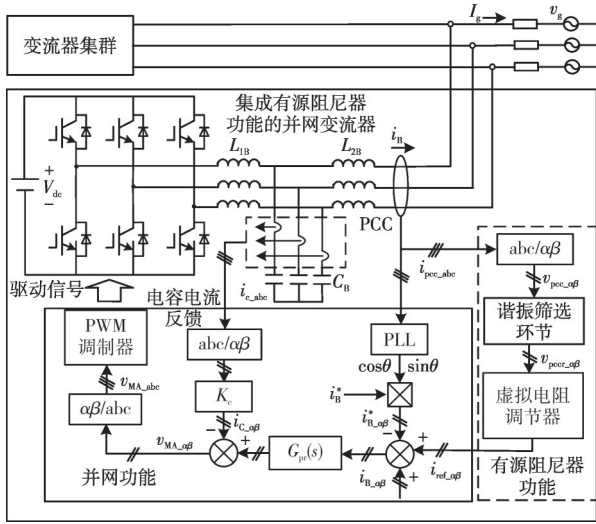


图 1 集成有源阻尼器功能的变流器系统框图

Fig.1 Block diagram of the converter system integrated with active damping functionality

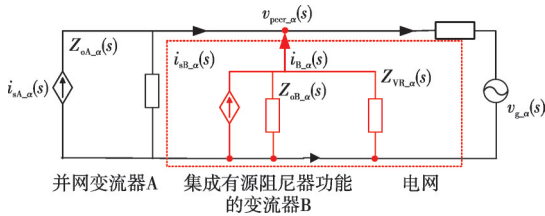


图 2 集成有源阻尼器功能的变流器等效阻抗模型

Fig.2 Equivalent impedance model of the converter integrated with active damping functionality

$i_{\text{href},\alpha\beta}$ 与 $v_{\text{pccr},\alpha\beta}$ 就具有相同的频率和相反的相位, 其比值为虚拟电阻 $Z_{\text{VR},\alpha}(s)$ 的取值 R_v 。因此, 有源阻尼器构造 $Z_{\text{VR},\alpha}(s)$ 能够重塑接入同一系统的变流器的总阻抗, 改善系统稳定性。

由于 $i_{\text{href},\alpha\beta}$ 与 $v_{\text{pccr},\alpha\beta}$ 具有相同的频率和相反的相位, 有源阻尼器功率可以写为:

$$S_{\text{XBmax}} = 3\bar{U}_x \sqrt{\sum_{k=1}^N (\bar{I}_k)^2} \quad (2)$$

式中: $\bar{U}_x$ 为谐振电压有效值; $\bar{I}_k$ 为第 k 个谐振分量电流有效值。通过改变 R_v 可改变有源阻尼器的工作容量, 为协调有源阻尼器功能与常规并网功能的容量分配, 需要设计一种改变 R_v 取值的方法。

1.2 基于傅里叶变换的虚拟电阻自适应策略

由 $Z_{\text{OA},\alpha}(s)/Z_{\text{OB},\alpha}(s)/Z_{\text{VR},\alpha}(s)$ 构成的系统可知, 有源阻尼器虚拟电阻值 R_v 过大, $Z_{\text{VR},\alpha}(s)$ 可忽略, 有源阻尼器功能失效; R_v 过小, 有源阻尼器的工作容量则过大。因此, R_v 需要具备实时调节

能力。图 3 给出了基于傅里叶变换的自适应调节策略。

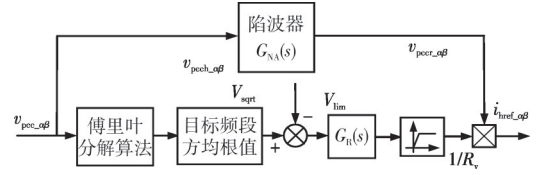


图 3 自适应虚拟电阻调节器的有源阻尼器控制框图

Fig.3 Control diagram of active damper of adaptive virtual resistor regulator

将采集到的 PCC 电压 V_{pcc} 通过快速傅里叶分解算法, 得到并筛选较大的谐振频段分量 $\{\bar{A}_1^*, \bar{A}_2^*, \dots, \bar{A}_m^*\}$, 计算方均根值 V_{sqr} :

$$V_{\text{sqr}} = \sqrt{(\bar{A}_1^*)^2 + (\bar{A}_2^*)^2 + \dots + (\bar{A}_m^*)^2} \quad (3)$$

求出的方均根值 V_{sqr} 和一个预设的阈值 V_{lim} 进行比较, 再将误差值送入电阻调节器 $G_R(s)$, 其表达式为:

$$G_R(s) = K_{\text{pR}} + \frac{K_{\text{iR}}}{s} \quad (4)$$

式中: K_{pR} 和 K_{iR} 分别为调节器的比例系数和积分系数。

$G_R(s)$ 的输出经过一个限幅环节后, 作为虚拟电阻值的倒数 $1/R_v$, 再通过陷波器消除 V_{pcc} 的工频电压等非谐振分量, 得到完整的电压谐振分量 $v_{\text{pccr},\alpha\beta} \circ v_{\text{pccr},\alpha\beta}/R_v$ 计算得到谐振电流基准 $i_{\text{href},\alpha\beta}$ 。本文采用工频陷波器为:

$$G_{\text{NA}}(s) = \prod_{h=1,3,5} \frac{s^2 + 2h\omega_0\xi_1s + (h\omega_0)^2}{s^2 + h\omega_0\xi_2s + (h\omega_0)^2} \quad (5)$$

当 V_{sqr} 小于阈值 V_{lim} , 差值接近于 0, 电阻调节器 $G_R(s)$ 的输出 $1/R_v$ 会固定为 0, 此时虚拟电阻接近无穷大。当系统出现谐振时, 谐振电压的幅值会显著增大, V_{pcc} 谐振分量序列的幅值会增大, V_{sqr} 超出 V_{lim} , 输出的 $1/R_v$ 会自动增加, 当 $1/R_v$ 调整到临界值 R_{vlim} , 系统达到稳定状态。通过设置合适的阈值 V_{lim} , 可以得到合理的虚拟电阻值 R_v 。其中, 阈值 V_{lim} 与有源阻尼容量的关系式为:

$$S_{\text{XB}} = 3\sqrt{\bar{U}^2 - (V_{\text{lim}} \times 100)^2} \sqrt{\sum_{k=1}^N b_k \bar{I}_k^2} \quad (6)$$

由式(6)可知, 阈值 V_{lim} 变小, 会增加有源阻尼器功能的容量, 反之会减少有源阻尼器功能的容量。因此, 改变 V_{lim} 即可动态调节有源阻尼器的

工作容量。

2 集成有源阻尼器功能的变流器容量协调策略

集成有源阻尼器功能的变流器中，功率并网功能和有源阻尼器功能会独占变流器的共同容量，因此需设置有效的容量协调策略。

2.1 集成有源阻尼器功能的变流器容量计算

为合理分配并网功能和有源阻尼器功能的容量，首先给出两种容量的计算方式。

1) 集成有源阻尼器功能的变流器并网容量和剩余容量计算

由于分布式发电系统出力存在不确定性，集成有源阻尼器功能的变流器的安装容量往往大于分布式电源的实际发电功率，即变流器有功并网后会存在一定的剩余容量，可用于有源阻尼器功能。

假设变流器的全部容量都可以用于调度，其额定容量由并网容量和剩余容量两个部分组成，其中并网容量和剩余容量关系为：

$$S_R^2 = S_N^2 - S_P^2 \quad (7)$$

式中： S_R 为变流器的剩余容量； S_N 为额定容量； S_P 为变流器的并网功率。

S_P 可由基频的电流分量与电压计算得到：

$$S_P = 3\bar{U}_1 \bar{I}_1 \quad (8)$$

式中： $\bar{U}_1$ 为基频电压的有效值； $\bar{I}_1$ 为基频电流分量的大小。

2) 有源阻尼器功能的容量计算

根据电网谐振的快速傅里叶变换基本原理，对PCC电流进行分解，得到谐振分量的有效值，接着筛选出有效值大于标准值的谐振分量。筛选后谐振电流有效值 $\{\bar{I}_1, \bar{I}_2, \bar{I}_3, \dots, \bar{I}_n\}$ 。对每一个谐振电流分量的补偿系数分别为 $\{b_1, b_2, b_3, \dots, b_n\}$ ，可以得到补偿后的电流为：

$$\bar{I}_{kR} = (1 - b_k) \bar{I}_k, k = 1, 2, 3, \dots, N \quad (9)$$

由此可以计算出有源阻尼器功能部分谐振治理容量为：

$$S_{XB} = 3\bar{U}_x \sqrt{\sum_{k=1}^N (b_k \bar{I}_k)^2} \quad (10)$$

$$\bar{U}_x = \sqrt{(\bar{U}^2 - \bar{U}_1^2)} \quad (11)$$

式中： $\bar{U}$ 为PCC电压有效值； $\bar{U}_1$ 为基频电压有效

值； $\bar{I}_k$ 为第 k 个谐振分量电流有效值。

2.2 变流器容量协调分配方法

集成有源阻尼器功能的变流器容量分配存在两种情况。

情况1为集成有源阻尼器功能的变流器剩余容量充足，其有功并网量、剩余容量和谐振治理容量之间的关系如图4(a)所示。该情况下以谐振治理后电能质量指标最优为容量分配目标。

情况2为集成有源阻尼器功能的变流器剩余容量不足，其容量关系如图4(b)所示。该情况下以达到目标电能质量指标，削减的并网功能容量最小为容量分配目标。

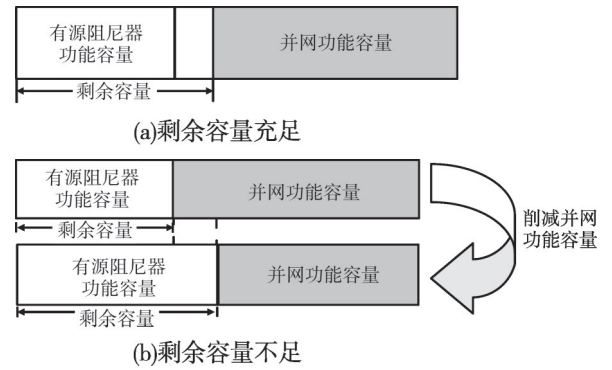


图4 容量分配示意图

Fig.4 Capacity allocation diagram

通过快速傅里叶变换对PCC电流进行分解，得到谐振电流的有效值，针对谐波电流进行补偿，因此可以定义电能质量综合指标参数 D 为：

$$D = \sum_{k=1}^N (1 - b_k) \bar{I}_k \quad (12)$$

式中： $\bar{I}_k$ 为第 k 个谐振电流分量有效值； b_k 为第 k 个谐振电流分量的补偿系数。

针对情况1，将电能质量综合指标参数 D 作为目标函数：

$$D = \sum_{k=1}^N (1 - b_k) \bar{I}_k \quad (13)$$

由于集成有源阻尼器功能的变流器额定容量是一定的，式(13)应满足约束条件：

$$\begin{cases} S_N = 3\bar{U} \sqrt{\bar{I}_0^2 + \sum_{k=1}^N (1 - b_k)^2 \bar{I}_k^2} \\ 0 \leq b_k \leq 1, k = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (14)$$

式中： S_N 为额定容量； $\bar{U}$ 为PCC电压有效值。由式(13)、式(14)可以构造拉格朗日函数：

$$L = \sum_{k=1}^N (1 - b_k) \bar{I}_k + \lambda \left(\bar{I}_0^2 + \sum_{k=1}^N (1 - b_k)^2 \bar{I}_k^2 - \frac{S_N^2}{9\bar{U}_1^2} \right) \quad (15)$$

式中: λ 为拉格朗日乘子。

由式(15)可得:

$$\begin{cases} \lambda = -\sqrt{\frac{N}{4\left(\frac{S_N^2}{9\bar{U}_1^2} - \bar{I}_0^2\right)}} \\ b_k = 1 - \frac{1}{\sqrt{\frac{N\bar{I}_k^2}{4\left(\frac{S_N^2}{9\bar{U}_1^2} - \bar{I}_0^2\right)}}}, k=1, 2, 3, \dots, N \end{cases} \quad (16)$$

针对情况 2, 将需要的补偿容量 S_{XB} 作为目标函数:

$$\min S_{XB} = 3\bar{U}_X \sqrt{\sum_{k=1}^N (b_k \bar{I}_k)^2} \quad (17)$$

以电能质量综合指标限制, 式(17)满足约束条件:

$$\begin{cases} D = \sum_{k=1}^N (1 - b_k) \bar{I}_k \\ 0 \leq b_k \leq 1, k=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (18)$$

由式(17)、式(18)可以构造拉格朗日函数:

$$L = \sum_{k=1}^N (b_k \bar{I}_k)^2 + \lambda \left(\sum_{k=1}^N (1 - b_k) \bar{I}_k - D \right) \quad (19)$$

由式(19)可得:

$$\begin{cases} \lambda = \frac{2\left(\sum_{k=1}^N \bar{I}_k - D\right)}{N} \\ b_k = \frac{\sum_{k=1}^N \bar{I}_k - D}{\bar{I}_k N} \quad (k=1, 2, 3, \dots, N) \end{cases} \quad (20)$$

当 PCC 处谐振电流较小或集成有源阻尼器功能的变流器在保证基本并网需求的同时剩余容量充裕时, 谐振电流补偿系数 b_k 取 1, 可以提高谐振抑制能力, 保证系统稳定运行。此时有源阻尼器功能占用的容量为:

$$S_{XB \max} = 3\bar{U}_X \sqrt{\sum_{k=1}^N (\bar{I}_k)^2} \quad (21)$$

谐振治理策略为: 基于电能质量综合指标参数 D , 求出第 k 个谐振分量的谐振电流补偿系数 b_k

($0 < b_k < 1$), 对谐振分量进行一定的补偿, 而不是全补偿, 实现对剩余容量的最优利用。此时集成有源阻尼器功能的变流器有源阻尼器功能占用的容量为:

$$S_{XB \min} = 3\bar{U}_X \sqrt{\sum_{k=1}^N (b_k \bar{I}_k)^2}, 0 < b_k < 1 \quad (22)$$

根据此时的有源阻尼器功能占用的容量可以求得虚拟电阻自适应变化的阈值 $V_{\lim}$:

$$V_{\lim} = \frac{S_{XB \min}}{\sqrt{\sum_{k=1}^N ((1 - b_k) \bar{I}_k)^2}} \quad (23)$$

为了减少计算量, 为容量协调策略设置启动条件。首先根据 PCC 电压的谐振分量序列计算方均根值 V_{sqr} , 与虚拟电阻自适应变化的阈值 $V_{\lim}$ 作比较, 如果 $V_{\text{sqr}} < V_{\lim}$, 系统处于稳定状态, 不需要对变流器容量进行调节; 如果 $V_{\text{sqr}} > V_{\lim}$, 此时需要判断是否满足全补偿条件, 计算集成有源阻尼器功能的变流器剩余容量 S_R 和全补偿所需的谐振治理容量 $S_{XB \max}$, 如果 $S_R > S_{XB \max}$, 采用全补偿策略, 此时所有的补偿系数 $b_k = 1, k=1, 2, \dots, N$, 否则针对剩余容量充足和不足两种情况计算补偿系数, 采取相应的补偿策略。

3 实验验证

为了验证本文所提容量协调策略的可行性, 搭建了变流器 A 和集成有源阻尼器功能的变流器 B 的实物样机, 变流器 A 用于产生谐振, 并由变流器 B 进行谐振抑制, 变流器 A、B 的额定容量为 20 kW, 实验平台结构如图 5 所示。采用回收式电网模拟电源-61830 模拟电网, 模拟电网的电压有效值为 220 V、频率为 50 Hz。直流侧采用直流电源 62100H-600S、62180D-1800 分别为变流器 A 与 B 提供直流电压。

集成有源阻尼器功能的变流器 B 与常规并网变流器 A 的主要参数见表 1、表 2。

图 6 给出了集成有源阻尼器功能的变流器 B 在强电网下的实验波形及分析结果, 变流器 B 的 A 相电流 THD(总谐波失真)为 0.91%, 电压畸变率为 0.93%, 各次谐波含量均较小, 波形质量较好。图 6 中基频电流分量为 42.85 A, 电压为 220 V, 由式(8)计算出变流器 B 的并网功率为 19.940 kW, 变流器 B 的额定容量为 20 kW, 用式(7)可以求得

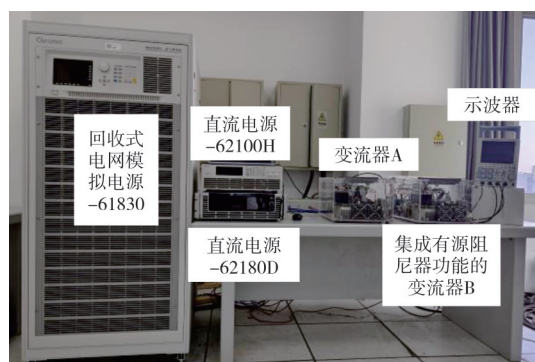


图5 实验平台

Fig.5 Experimental platform

表1 集成有源阻尼器功能的变流器参数

Table 1 Parameters of the converter integrated with active damping functionality

参数名称	数值 f_{sp}
直流母线电压 V_{dc}/V	700
电网电压幅值 U_g/V	311
电网频率 f_0/Hz	50
额定容量 S_N/kVA	20
逆变侧电感 L_{1B}/mH	2.2
滤波电容 $C_B/\mu F$	1.6
并网侧电感 L_{2B}/mH	0.9

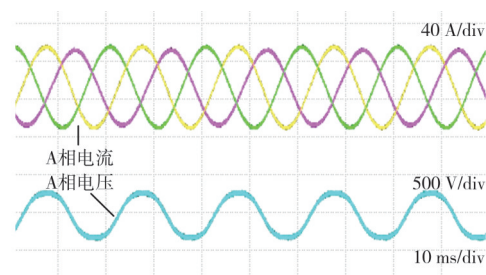
表2 变流器A参数

Table 2 Parameters of converter A

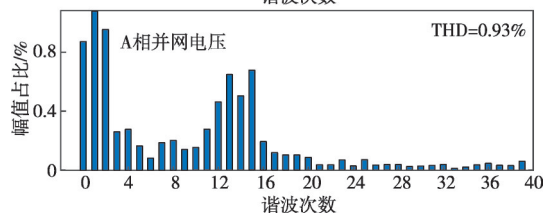
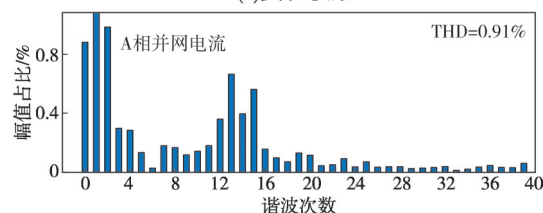
参数名称	数值 f_{sp}
直流母线电压 V_{dc}/V	700
电网电压幅值 U_g/V	311
电网频率 f_0/Hz	50
额定容量 S_N/kVA	5
逆变侧电感 L_{1B}/mH	3
滤波电容 $C_B/\mu F$	15
并网侧电感 L_{2B}/mH	1

集成有源阻尼器功能的变流器B的剩余容量 S_{RB} 为 0.06 kW。

图7给出了 $L_g=1$ mH时变流器A单独运行的实验波形分析, 观察FFT(快速傅里叶交换)分析结果发现: 12~15次电流谐波的幅值占比分别达到了0.9%、1.2%、0.98%、1.14%, 对应频次的电压谐波的幅值占比分别达到了1.34%、1.68%、1.49%、1.42%。说明在弱电网情况下 $L_g=1$ mH时, 系统在该频率处发生了谐振, 通过电流波形也可以看出其存在明显的谐振现象。



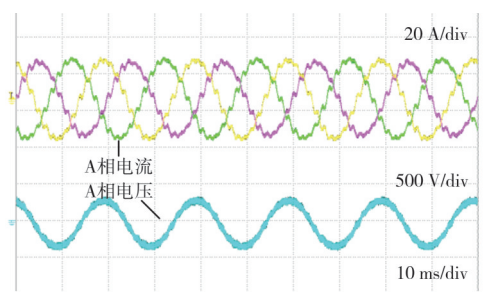
(a)实验波形



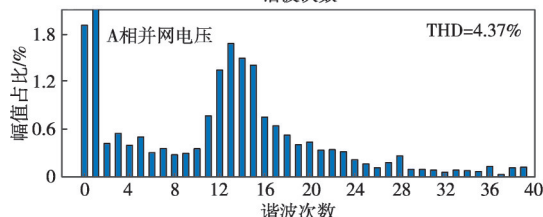
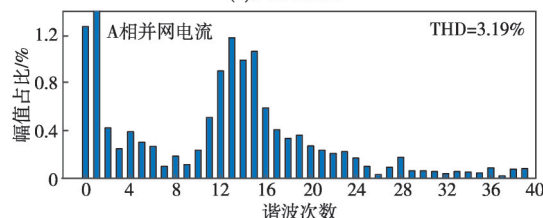
(b)傅里叶分析

图6 变流器B的实验波形分析

Fig.6 Experimental waveform analysis of converter B



(a)实验波形



(b)傅里叶分析

图7 $L_g=1$ mH时变流器A单独运行的实验波形分析
Fig.7 Experimental waveform analysis of converter A operating independently at $L_g=1$ mH

图8给出了 $L_g=1$ mH时,并联变流器B后变流器A的实验波形分析,通过FFT分析结果可知,原谐振频率附近的12~15次电流谐波幅值占比显著降低,均低于5%,且THD为2.81%,降至3%以下,同时对应频次的电压谐波幅值占比也显著降低,均低于0.6%。有源阻尼器有效抑制了该频率附近的谐振,变流器A的电流波形得到了明显改善,波形质量较好,容量充足情况下,谐振被治理至允许范围内,已无明显谐振现象,且电能质量较好。

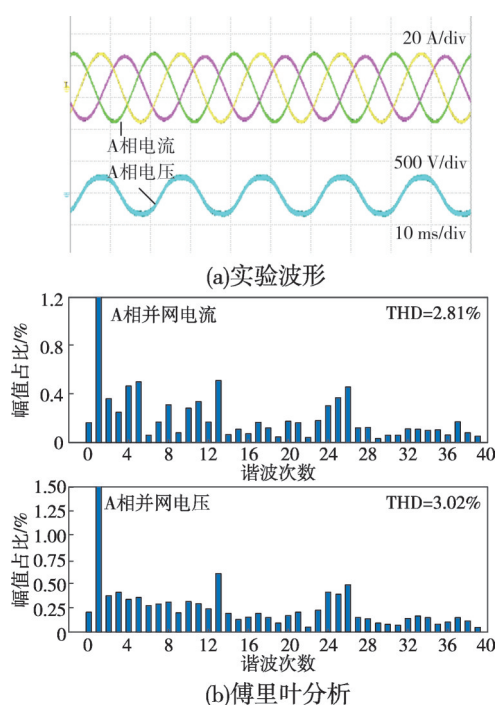


图8 $L_g=1$ mH时变流器A并联变流器B的实验波形

Fig.8 Experimental waveforms of converter A in parallel with converter B at $L_g=1$ mH

图9给出了变流器B剩余容量充足时的容量分配情况。其中, S_1 为变流器B的并网功能容量,由图6中基频电压电流分量的乘积可求得为19.940 kW;通过图7的FFT分析可知各次电流谐波的含量,根据各次谐波电压的谐波含量,计算得到有源阻尼器功能容量的实际值 S_2 ;剩余容量 S_R 为额定容量与并网功能容量以及有源阻尼器功能容量的差值。从图9可知,在 t_0 时刻变流器B接入PCC,从 t_0 时刻起,虚拟电阻会自适应增大,从而抑制谐振,到达 t_1 时刻时,有源阻尼器功能的实际容量增长到足以将谐振治理到允许范围内,此时

实际容量小于变流器剩余容量,剩余容量充足。

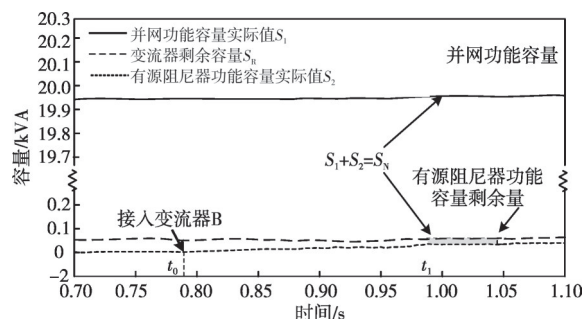


图9 剩余容量充足时变流器B的容量分配

Fig.9 Capacity allocation of converter B with enough remaining capacity

图10给出了 $L_g=3$ mH时变流器A单独运行的实验波形分析。通过FFT分析结果发现,11~14次的电流谐波幅值占比产生了很大的上升,占比分别达到了7.27%、9.64%、9.38%、10.11%,THD为11.36%,对应频次的电压谐波幅值为8.76%、12.11%、11.89%、11.67%。在 $L_g=3$ mH的弱电网情况下,该频率附近发生了严重谐振,从变流器A的电压电流波形也能看出严重谐振。通过谐波电流分析,可求得有源阻尼器功能部分谐振治理所需容量为 $S_{XB}=0.110$ 1 kW,远远超出了有源阻尼器的功能容量,需要对其容量进行调节分配。

图11给出了 $L_g=3$ mH时有无使用本文所提策略的并联集成有源阻尼器功能变流器B和变流器A的实验波形分析。图11(a)和(b)为未使用本文所提容量协调策略的情况,图11(b)的分析结果显示11~14次的电流谐波幅值占比有了显著下降,分别为0.57%、1.23%、2.58%、2.05%,THD虽降为6.14%但仍较高,对应频次的电压谐波幅值占比显著下降,分别为0.97%、2.12%、4.43%、3.61%,其THD为7.08%,电流电压的畸变程度依旧较为明显,变流器A电压电流的波形得到了明显的改善,但还存在一定程度的失真,此时系统的谐振情况依旧比较严重。原因是集成有源阻尼器功能的变流器B的剩余容量为0.06 kW,小于有源阻尼器功能部分谐振治理所需容量0.110 1 kW,不足以将谐振治理到要求的范围内。因此用本文所提策略对容量进行协调,图11(c)和(d)为使用本文所提容量协调策略的实验波形分析,使用该

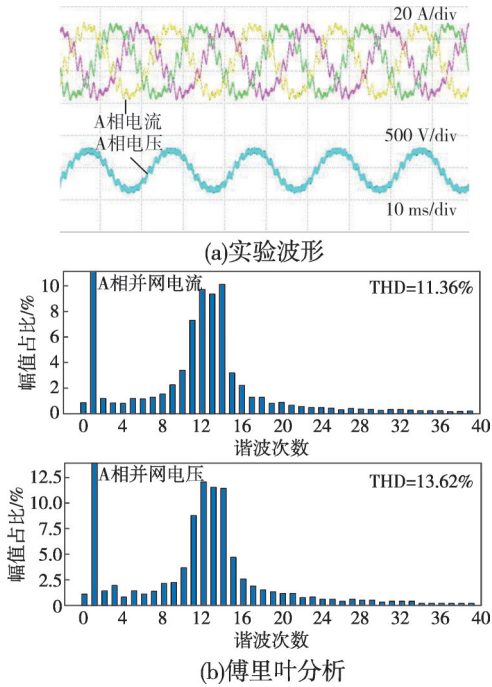


图10 $L_g=3$ mH时变流器A单独运行的实验波形分析

Fig.10 Experimental waveform analysis of converter A operating independently at $L_g=3$ mH

策略削减了变流器B并网功能的部分容量,提高了有源阻尼功能的容量,通过计算,此时的有源阻尼功能的容量为0.1014 kW。FFT分析结果表

明11~14次的电流谐波幅值占比均降至0.2%以下,THD为2.86%,电流畸变程度低,对应频次的电压谐波幅值占比降至0.6%以下,电压畸变率为3.12%,此时,变流器A的电流波形得到了明显改善,无明显谐振现象与失真,容量不足的情况下,协调后的有源阻尼功能容量足以将谐振治理到允许范围,并使并网电压、电流谐振含量降低到设定的阈值 V_{lim} 。此时,系统回归稳定。

图12给出了剩余容量不足时变流器B的容量分配情况,由图10、图11的分析结果,对集成有源阻尼功能的变流器B的各部分容量进行计算绘制变流器B的容量分配图。从图12可知,在 t_0 时刻变流器B接入PCC,有源阻尼器功能检测到谐振含量超过阈值 V_{lim} ,从 t_0 时刻开始,虚拟电阻会自适应增大,到达 t_1 时刻时,有源阻尼器功能的实际容量增长到最大(等于变流器剩余容量),此时集成有源阻尼器功能的变流器额定功率全调度,仍然不足以将谐振治理到允许范围内,本文所提的容量协调策略开始发挥作用,削减部分并网容量用以治理谐振。通过式(23)得到阈值 V_{lim} ,通过调节有源阻尼器功能虚拟电阻临界值 R_{vlim} ,调节有源阻尼器功能部分的容量,使其达到满足所需

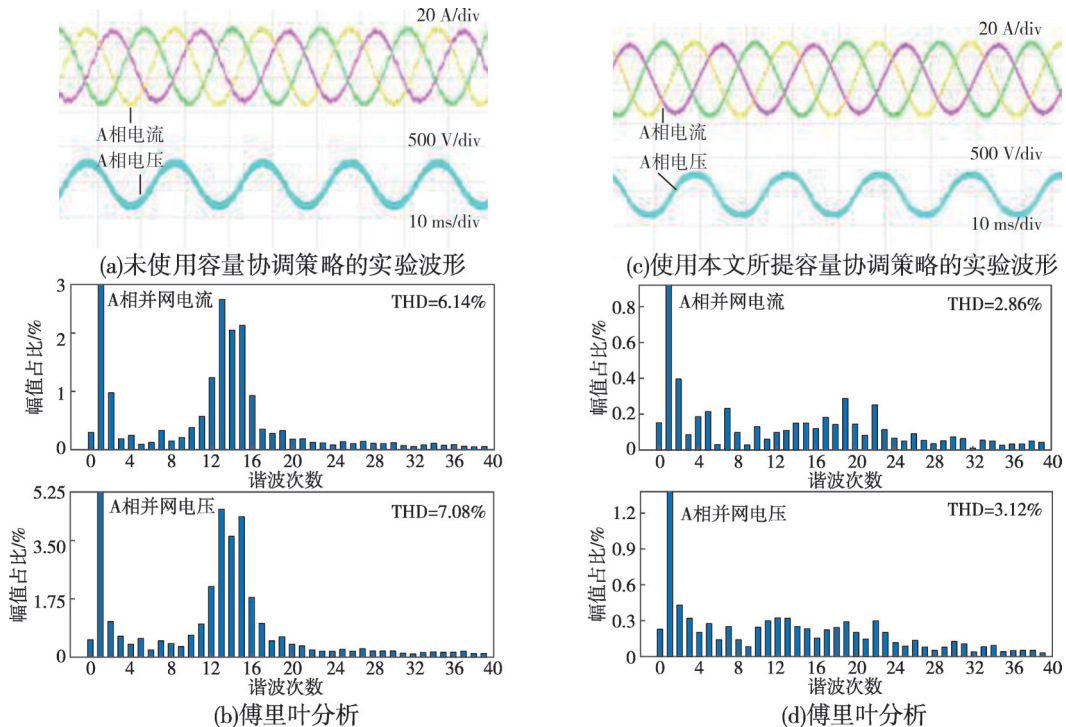


图11 $L_g=3$ mH时变流器A并联变流器B的实验波形

Fig.11 Experimental waveforms of converter A in parallel with converter B at $L_g=3$ mH

治理谐振容量的大小,进而将谐振治理到允许范围内且并网容量削减量最小的目标。

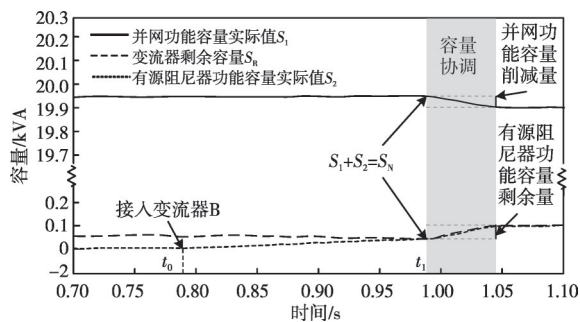


图12 剩余容量不足时变流器B的容量分配

Fig.12 Capacity allocation of converter B with insufficient remaining capacity

4 结语

本文针对集成有源阻尼器功能的变流器存在的容量协调分配问题,首先基于傅里叶变换建立了虚拟电阻自适应策略,实现对有源阻尼器功能容量的动态调节。在此基础上,提出了一种集成有源阻尼器功能的变流器容量协调策略,针对剩余容量充足和不足两种情况,分别制定容量协调优化策略,有效解决了变流器总容量有限时,有源阻尼器功能与功率并网功能的容量分配问题,并通过实验验证容量协调分配策略的有效性,在保证系统稳定可靠并网的基础上,实现对其他变流器谐振的有效抑制。未来将进一步考虑多台集成有源阻尼器功能的变流器在同一系统下同步抑制谐振问题时,通过谐振抑制频带在多设备间的合理分配,提高各台设备的效率和谐振抑制能力,进一步增强集成有源阻尼器功能的变流器的实用性。

参考文献

[1] 吴恒,阮新波,杨东升.弱电网条件下锁相环对LCL型并网逆变器稳定性的影响研究及锁相环参数设计[J].中国电机工程学报,2014,34(30):5259-5268.
WU Heng, RUAN Xinbo, YANG Dongsheng. Research on the stability caused by phase-locked loop for LCL-type grid-connected inverter in weak grid condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(30): 5259-5268.

[2] 姜云龙,司鑫尧,史鸿飞,等.弱电网下计及锁相环影响的并网逆变器稳定性提升方法[J].电力系统自动化,2022,

46(24):113-120.

JIANG Yunlong, SI Xinyao, SHI Hongfei, et al. Stability improvement method of grid-connected inverter considering phase-locked loop effect in weak grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 113-120.

- [3] 张成,赵涛,朱爱华,等.弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J].电力工程技术,2022,41(3):224-230.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 224-230.
- [4] 陈新,王赞程,龚春英,等.采用阻抗分析方法的并网逆变器稳定性研究综述[J].中国电机工程学报,2018,38(7):2082-2094.
CHEN Xin, WANG Yuncheng, GONG Chunying, et al. Overview of stability research for grid-connected inverters based on impedance analysis method [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 2082-2094.
- [5] MANSOUR M Z, MOHAMMED N, RAVANJI M H, et al. Output impedance derivation and small-signal stability analysis of a power-synchronized grid following inverter [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2022, 37(4): 2696-2707.
- [6] LIAO Y C, WANG X F. Impedance-based stability analysis for interconnected converter systems with open-loop RHP poles [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(4): 4388-4397.
- [7] 田莞蕊,李建国,张雅静,等.基于无源控制的并网逆变器特定次谐波电流抑制方法[J].电力工程技术,2023,42(2):215-222.
TIAN Yuansong, LI Jianguo, ZHANG Yajing, et al. Selective harmonic current suppression method for grid-connected inverters based on passivity-based control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 215-222.
- [8] ZHOU L W, PREINDL M. Optimal tracking and resonance damping design of cascaded modular model predictive control for a common-mode stabilized grid-tied LCL inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9226-9240.
- [9] ZHANG Z Y, WANG P G, JIANG P, et al. Robust control method of grid-connected inverters with enhanced current quality while connected to a weak power grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(6): 7263-7274.
- [10] CHEN C, XIONG J, WAN Z Q, et al. A time delay compensation method based on area equivalence for active damping of an LCL-type converter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(1): 762-772.

- [11] WANG T K, YAO W X, LI C M, et al. Aliasing suppression with negligible phase lag for multi-sampled LCL-type grid-tied inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(10): 12520-12535.
- [12] 高家元, 肖凡, 姜飞, 等. 弱电网下具有新型PLL结构的并网逆变器阻抗相位重塑控制[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(20): 6682-6694.
GAO Jiayuan¹, XIAO Fan¹, JIANG Fei, et al. Grid-connected inverter impedance phase reshaping control with novel PLL structure in weak grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(20): 6682-6694.
- [13] 杨伊茜, 陈杰, 万雨朦, 等. 电网电压前馈控制VSG的阻抗建模与并网稳定性分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(6): 52-61.
YANG Yiqian, CHEN Jie, WAN Yumeng, et al. The impedance modelling and stability analysis of VSG with grid voltage feedforward control [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(6): 52-61.
- [14] HE Y Y, WANG X H, RUAN X B, et al. Hybrid active damping combining capacitor current feedback and point of common coupling voltage feedforward for LCL-type grid-connected inverter [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(2): 2373-2383.
- [15] WANG X F, BLAABJERG F, LISERRE M, et al. An active damper for stabilizing power-electronics-based AC systems [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(7): 3318-3329.
- [16] BAI H F, WANG X F, LOH P C, et al. Passivity enhancement of grid-tied converters by series LC-filtered active damper [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(1): 369-379.
- [17] JIA L, RUAN X B, ZHAO W X, et al. An adaptive active damper for improving the stability of grid-connected inverters under weak grid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(11): 9561-9574.
- [18] ALI AZGHANDI M, BARAKATI S M, YAZDANI A. Impedance-based stability analysis and design of a fractional-order active damper for grid-connected current-source inverters [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2021, 12(1): 599-611.
- [19] 史明明, 姜云龙, 史鸿飞, 等. 集成有源阻尼器功能的并网逆变器虚拟电阻补偿控制方法[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(4): 119-126.
SHI Mingming, JIANG Yunlong, SHI Hongfei, et al. Virtual resistance compensation control method for grid-connected inverter integrated with active damper function [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 119-126.
- [20] LIN Z H, RUAN X B, ZHANG H, et al. A hybrid-frame control based impedance shaping method to extend the effective damping frequency range of the three-phase adaptive active damper [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2023, 70(1): 509-521.
- [21] YANG P C, XIA Y H, YU M, et al. A decentralized coordination control method for parallel bidirectional power converters in a hybrid AC-DC microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(8): 6217-6228.
- [22] YAN Y, LI Q, CHEN W R, et al. Online control and power coordination method for multistack fuel cells system based on optimal power allocation [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8158-8168.
- [23] 曾正, 邵伟华, 赵伟芳, 等. 多功能并网逆变器与并网微电网电能质量的分摊控制[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(19): 4947-4955.
ZENG Zheng, SHAO Weihua, ZHAO Weifang, et al. Coordination Control of Multiple Multi-functional Grid-tied Inverters to Share Power Quality Issues for Grid-connected Micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(19): 4947-4955.
- [24] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 多功能并网逆变器及其在微电网电能质量定制中的应用[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 58-67.
ZENG Zheng, ZHAO Rongxiang, YANG Huan, et al. A multi-functional grid-connected inverter and its application to customized power quality of microgrid [J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 58-67.
- [25] 李小叶, 李永丽, 张玮亚, 等. 基于多功能并网逆变器的电能质量控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 556-562.
LI Xiaoye, LI Yongli, ZHANG Weiya, et al. A power quality control strategy based on multi-functional grid-connected inverter [J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 556-562.

收稿日期: 2024-06-28; 修回日期: 2024-09-05

作者简介:

张可嘉(1973), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电能质量及其控制技术。

陈旺(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为高效电能变换与传动技术。(通信作者)

(本文编辑: 徐 晗)