

多母线直流系统谐振交互与谐波传递机理研究

陈勇¹, 李建标¹, 陈建福¹, 裴星宇¹, 吴宏远¹, 黄春宇²

(1. 广东电网有限责任公司 直流配用电研究中心, 广东 珠海 519000;

2. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 直流配电网直流侧的特点是多母线级联、多变换器及母线强耦合, 容易引发谐波谐振交互, 威胁系统设备安全运行。针对直流母线间谐振交互及谐波传递机理不清晰的问题, 首先构建了计及隔离型和非隔离型中间变换器耦合效应的多母线直流系统谐波阻抗模型, 基于此从谐振可激性和可观性角度研究了多母线直流系统谐波谐振分布规律及影响范围; 接着基于中间变换器的耦合传递系数模型, 探究了中间变换器对两侧直流母线间谐振交互的影响机理及规律, 提出了优化中间变换器参数实现抑制母线间谐振交互的思路; 最后搭建多母线直流系统仿真模型, 验证了理论分析的正确性和所提中间变换器参数优化思路的有效性。

关键词: 直流; 电能质量; 谐波谐振; 交互作用; 中间变换器

中图分类号: TM721.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed25703

Research on Resonant Interaction and Harmonic Transmission Mechanism in Multi-bus DC Systems

CHEN Yong¹, LI Jianbiao¹, CHEN Jianfu¹, PEI Xingyu¹, WU Hongyuan¹, HUANG Chunyu²

(1. DC Power Distribution and Consumption Technology Research Centre, Guangdong Power Grid Co., Ltd.,

Zhuhai 519000, Guangdong, China; 2. College of Electrical and Information Engineering,

Hunan University, Changsha 410082, Hunan, China)

Abstract: The characteristics of the DC side of the DC distribution network are multi bus cascades, multiple converters, and strong coupling of the buses, which can easily cause harmonic resonance and threaten the safe operation of system equipment. Aims at the problem of unclear resonance interaction and harmonic transmission mechanism between DC busbars, firstly, a harmonic impedance model of a multi-bus DC system was constructed, in which the coupling effect of isolated and non-isolated interlinking converters has been taken into account. Based on this model, the distribution and influence range of harmonic resonance in the multi-bus DC system were studied from the perspectives of resonance excitability and observability. Then, based on the coupling transfer coefficient model of the intermediate converter, the influence mechanism and law of the interlinking converter on the resonant interaction between the two DC busbars were explored, and a method of optimizing the parameters of the interlinking converter to suppress the resonant interaction between the busbars was proposed. Finally, a simulation model of a multi-bus DC system was constructed to verify the correctness of the theoretical analysis and the effectiveness of the proposed optimization approach for interlinking converter parameters.

Key words: DC; power quality; harmonic resonance; interaction; intermediate converter

随着分布式新能源的广泛接入和用户用电形式变化引起的直流负载增加, 直流配电技术在效率、经济性、可靠性等方面的优势逐渐凸显, 直流配电网成为新型电力系统发展的重要趋势^[1-2]。直流配电网呈现交直流混合、多母线级联的结构特点, 并且不同母线之间经电力电子变换器发生

交互耦合, 给直流配电系统建模和运行特性分析带来巨大挑战^[3-4]。

与交流电网类似, 直流配电网中也存在电压偏差、谐波、电压波动/闪变等电能质量问题^[3,5]。由于电力电子变换器无源元件及控制环路与线路阻抗之间的交互容易产生谐波谐振, 严重威胁

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目 (GDKJXM20222186)

作者简介: 陈勇 (1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为直流配用电技术、电网规划、智能电网, Email: 5665035@qq.com

通讯作者: 李建标 (1984—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为直流配用电技术、能源互联网、智能电网, Email: hljianbiao@126.com

直流配电网关键设备安全及可靠运行。对直流配电系统谐波及谐振问题研究成为学者关注的热点问题之一。文献[6]引入了交流工频整数倍的“纹波”概念描述了直流电压谐波,并在此基础上研究了直流配电网纹波形成机理与叠加特性。文献[7]针对交直流混合微电网混合能源供电和多类型负载特点,研究了处于孤岛和并网状态下交直流混合微电网运行的谐波特性。文献[8]通过谐波模态分析得到影响交直流混合配电网节点谐波谐振的关键频率,并利用参与因子计算系统不同节点对谐振的参与程度。文献[9]构建了基于电缆分布参数模型的柔性直流配网数学模型及谐波电压增益表达式,并研究了孤岛运行方式下某实际柔性直流配电网的高频谐波谐振特性。以上文献在交直流系统谐波问题的产生机理方面开展了研究,然而较少关注交-直、直-直母线的中间变换器对系统谐波谐振交互的影响。

文献[10]通过构建 DC-DC 和 AC-DC 级联变换器谐波状态空间模型,研究了两级式三相变流器并网系统的交直流谐波交互特性。文献[11]推导了模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)初始谐波电流产生的新谐波电压及谐波电流表达式,在此基础上分析了 MMC 交直流侧谐波传导特性,并揭示了谐波频率和相序变换关系。文献[12]提出了一种交直流混联配电网交互作用模型构建方法,构建了包含多类型变换器的交直流混联配电网模型,并研究了 AC-DC 变换器对交流子电网和直流子电网谐振交互的影响机理。以上文献主要关注交直流谐波传导和谐振交互机理研究,在交直流系统的直流侧不同直流母线间谐波谐振交互机理及影响因素方面有待进一步深入探索。

针对现有研究不足,本文通过构建计及中间变换器耦合效应的多母线直流系统谐波阻抗模型,深入分析了多母线直流系统谐波交互机理。首先,构建了双有源桥(dual active bridge, DAB), Buck, Boost 等典型直流变换器端口阻抗模型,建立了多母线直流系统谐波阻抗模型。然后,基于奇异值分解(singular value decomposition, SVD)法^[13]确定了系统谐振频率及谐振强度,根据可激性和可观性研究了谐振的影响范围,探究了直流母线中间变换器对两侧谐波谐振的交互影响规律,提出了优化中间变换器参数实现抑制母线间谐振交互的思路。最后,在 PSCAD/EMTDC 中搭

建多母线直流系统验证了理论分析的正确性和中间变换器参数优化思路的有效性。

1 多母线直流系统谐波阻抗建模

1.1 多母线直流系统介绍

图1所示为直流配电系统典型结构,其中连接交流电网和直流配电网的 AC-DC 变换器起到维持直流电压和进行两侧功率交换的作用。在直流侧,光伏(photovoltaic, PV)发出的直流电经 DC-DC 变换器接到直流母线,储能经 Buck-Boost 双向 DC-DC 变换器接到直流母线。直流配电网通常经隔离型的 DAB 或非隔离型的 Buck, Boost 等直流变换器变换得到多个电压等级,以满足不同类型负载对电压和功率的需求^[5]。

直流配电网呈现交直流混合、多母线级联的结构特点,且交-直、直-直母线间经电力电子变换器发生耦合。文献[10-12]已基于两电平或多电平 AC-DC 变换器对谐波及谐振在交-直母线间的耦合交互进行了研究,但没有深入探究直流配电系统直-直母线间谐波及谐振交互特性。本文主要开展多母线直流系统谐振交互谐波传递机理研究,不再涉及交-直母线谐波谐振交互。

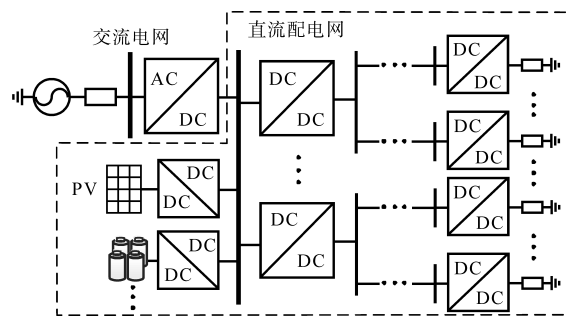


图1 典型直流配电系统结构

Fig.1 Typical DC distribution system structure

图2所示为典型多母线直流系统,其中未考虑交-直母线谐波谐振交互影响,因而将交流电网及 AC-DC 变换器等效成电压源和输出阻抗串联的形式。图中, PV 经 Boost 变换器接到电压为 v_{dc1} 的直流母线上,考虑到储能一般工作在放电模式或充电模式,本文以储能充电模式为例进行分析,因此将储能等效成负载经 Buck₂ 连接到直流母线形式;隔离型 DAB 将电压 v_{dc1} 变换为 v_{dc2} , 为负载变换器 Buck₃ 和 Buck₄ 供电;非隔离型变换器 Buck₁ 将电压 v_{dc1} 变换为 v_{dc3} , 为负载变换器 Buck₅ 和 Buck₆ 供电。图中直流配电系统中还考虑了线路阻抗及 Buck 变换器输入侧稳压电容,本文将以

此为案例系统开展多母线直流系统谐波谐振交互机理及影响因素研究。

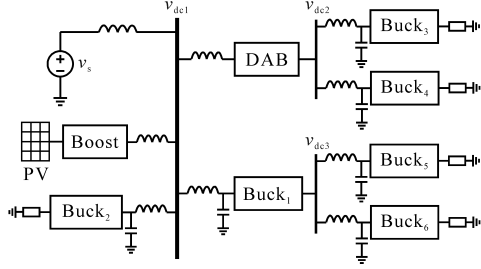


图2 典型多母线直流系统结构

Fig.2 Typical multi-bus DC system structure

1.2 直流变换器端口阻抗建模

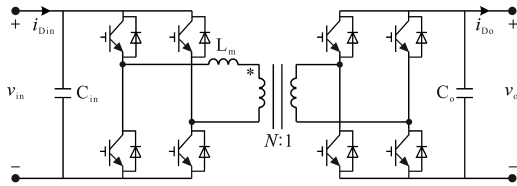
1.2.1 DAB端口阻抗建模

DAB电路拓扑如图3a所示,其采用单移相控制策略,通过控制桥间移相角度实现功率从高压侧向低压侧传输并维持低压侧电压的稳定^[14]。DAB作为两级直流母线之间的互联装置,其二端口等效阻抗模型反映了两侧母线间的耦合关系。DAB二端口等效阻抗模型如图3b所示,其输出侧为电压源串联阻抗的戴维南等效电路形式,输入侧为电流源并联导纳的诺顿等效电路形式。DAB输入输出电压及电流之间满足:

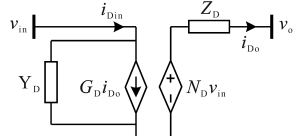
$$\begin{bmatrix} i_{Din} \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_D & G_D \\ N_D & -Z_D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in} \\ i_{Do} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: Y_D 、 Z_D 分别为DAB二端口模型等效输入导纳和输出阻抗; G_D 为DAB输出侧电流对输入侧电流的耦合传递系数; N_D 为DAB输入侧电压对输出侧电压的耦合传递系数。

Y_D 、 Z_D 、 G_D 及 N_D 具体表达式可参见文献[14],本文不再赘述。



(a)DAB电路拓扑



(b)DAB二端口阻抗电路模型

图3 DAB端口阻抗建模

Fig.3 DAB port impedance modeling

1.2.2 Buck变换器端口阻抗建模

Buck变换器通过控制输出端电压实现直流降压功能,其电路拓扑如图4a所示。在案例系统

中Buck变换器的作用有两点:一是作为两级直流母线中间的互联装置,如图2中的Buck₁;二是作为降压变换器直接给负载供电,如图2中的Buck₂~Buck₆。互联两级母线的Buck变换器二端口等效阻抗模型同样反映了两侧母线间耦合关系,其等效阻抗模型如图4b所示。Buck变换器输入输出电压及电流之间满足:

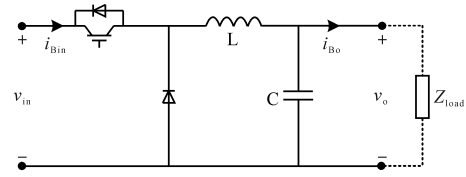
$$\begin{bmatrix} i_{Bin} \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_B & G_B \\ N_B & -Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{in} \\ i_{Bo} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: Y_B 、 Z_B 分别为Buck二端口模型等效输入导纳和输出阻抗; G_B 为Buck输出侧电流对输入侧电流的耦合传递系数; N_B 为Buck输入侧电压对输出侧电压的耦合传递系数。

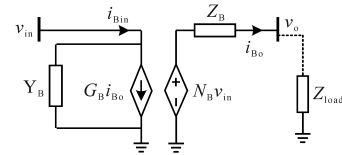
Y_B 、 Z_B 、 G_B 及 N_B 具体表达式可参见文献[15]。

对于系统末端负载Buck变换器,即图2中的Buck₂~Buck₆,只需要得到其输入导纳 Y_{Bm} ($m=2, 3, \dots, 6$)。在图4中考虑Buck输出侧接入负载阻抗 Z_{load} ,即有:

$$Y_{Bm} = \frac{i_{Bin}}{v_{in}} = Y_B + G_B \frac{N_B}{Z_B + Z_{load}} \quad (3)$$



(a)Buck电路拓扑



(b)Buck变换器二端口阻抗电路模型

图4 Buck变换器端口阻抗建模

Fig.4 Buck port impedance modeling

1.2.3 Boost变换器端口阻抗建模

光伏Boost变换器端口阻抗建模如图5所示。本文中Boost变换器作光伏发电并网装置,其输出侧与直流电网连接,Boost变换器输出侧电压大小由电网决定,最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制算法给出光伏Boost变换器输入侧电压参考值,Boost变换器通过控制输入侧电压 v_{pv} 维持在最大功率点附近从而实现光伏的最大功率。光伏发电单元和Boost变换器作为一个整体算作系统的末端,建模时只需要考虑其导纳 Y_{Bos} ,即

$$Y_{Bos} = \frac{i_o}{v_o} \quad (4)$$

Y_{Bos} 是光伏 Boost 变换器从电网侧看进去的等效导纳,其具体表达式可参见文献[16]。

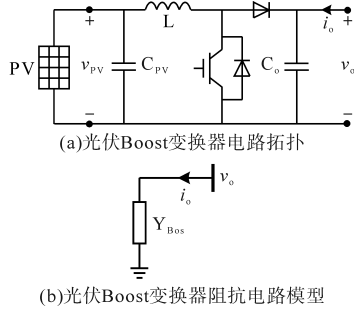


图 5 光伏 Boost 变换器端口阻抗建模

Fig.5 PV's Boost port impedance modeling

1.3 系统谐波阻抗建模

在前文建立直流变换器端口阻抗模型的基础上,可得如图 6 所示的多母线直流系统等效阻抗模型。为方便构建系统节点导纳矩阵,首先给系统各节点进行编号,如图 6 所示。设注入节点 $k(k=1,2,\dots,11)$ 的谐波电流为 $I_{h,k}$,则根据系统等效阻抗模型可列写其谐波阻抗节点导纳矩阵。

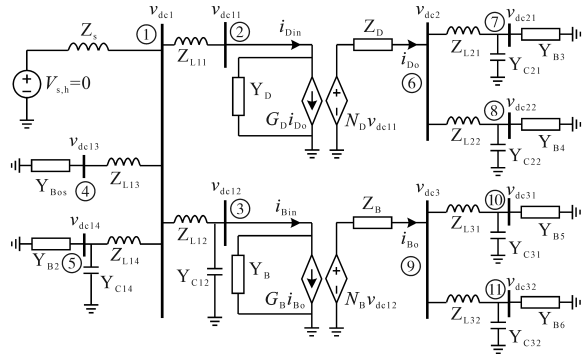


图 6 多母线直流系统等效阻抗模型

Fig.6 Equivalent impedance model of multi-bus DC system

根据电路原理,对节点 1 可得:

$$I_{h,1} = \left(\frac{1}{Z_s} + \sum_{i=1}^4 \frac{1}{Z_{L,i}} \right) v_{dc1} - \frac{1}{Z_{L,11}} v_{dc11} - \frac{1}{Z_{L,12}} v_{dc12} - \frac{1}{Z_{L,13}} v_{dc13} - \frac{1}{Z_{L,14}} v_{dc14} \quad (5)$$

对节点 2 可得:

$$I_{h,2} = -\frac{1}{Z_{L,11}} v_{dc1} + \left(\frac{1}{Z_{L,11}} + Y_D + G_D \frac{N_D}{Z_D} \right) v_{dc11} - \frac{G_D}{Z_D} v_{dc2} \quad (6)$$

对节点 3 可得:

$$I_{h,3} = -\frac{1}{Z_{L,12}} v_{dc1} + \left(\frac{1}{Z_{L,12}} + Y_B + G_B \frac{N_B}{Z_B} + Y_{C12} \right) v_{dc12} - \frac{G_B}{Z_B} v_{dc3} \quad (7)$$

对节点 4 可得:

$$I_{h,4} = -\frac{1}{Z_{L,13}} v_{dc1} + \left(\frac{1}{Z_{L,13}} + Y_{\text{Bos}} \right) v_{dc13} \quad (8)$$

对节点 5 可得:

$$I_{h,5} = -\frac{1}{Z_{L,14}} v_{dc1} + \left(\frac{1}{Z_{L,14}} + Y_{B2} + Y_{C14} \right) v_{dc14} \quad (9)$$

对节点 6 可得:

$$I_{h,6} = -\frac{N_D}{Z_D} v_{dc11} + \left(\frac{1}{Z_D} + \frac{1}{Z_{L,21}} + \frac{1}{Z_{L,22}} \right) v_{dc2} - \frac{1}{Z_{L,21}} v_{dc21} - \frac{1}{Z_{L,22}} v_{dc22} \quad (10)$$

对节点 7 可得:

$$I_{h,7} = -\frac{1}{Z_{L,21}} v_{dc2} + \left(\frac{1}{Z_{L,21}} + Y_{B3} + Y_{C21} \right) v_{dc21} \quad (11)$$

对节点 8 可得:

$$I_{h,8} = -\frac{1}{Z_{L,22}} v_{dc2} + \left(\frac{1}{Z_{L,22}} + Y_{B4} + Y_{C22} \right) v_{dc22} \quad (12)$$

对节点 9 可得:

$$I_{h,9} = -\frac{N_B}{Z_B} v_{dc12} + \left(\frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_{L,31}} + \frac{1}{Z_{L,32}} \right) v_{dc3} - \frac{1}{Z_{L,31}} v_{dc31} - \frac{1}{Z_{L,32}} v_{dc32} \quad (13)$$

对节点 10 可得:

$$I_{h,10} = -\frac{1}{Z_{L,31}} v_{dc3} + \left(\frac{1}{Z_{L,31}} + Y_{B5} + Y_{C31} \right) v_{dc31} \quad (14)$$

对节点 11 可得:

$$I_{h,11} = -\frac{1}{Z_{L,32}} v_{dc3} + \left(\frac{1}{Z_{L,32}} + Y_{B6} + Y_{C32} \right) v_{dc32} \quad (15)$$

设系统谐波阻抗节点导纳矩阵为 Y_h ,则有 $[I_{h,1}, I_{h,2}, \dots, I_{h,11}]^T = Y_h [v_{dc1}, v_{dc2}, \dots, v_{dc32}]^T$,根据式(5)~式(15)可得到系统节点导纳矩阵 Y_h ,后续将基于此研究多母线直流系统谐波谐振交互机理。

2 多母线直流系统谐波谐振交互分析

本节首先基于 SVD 分析系统谐振频率及谐振强度,接着根据可激性和可观性研究了谐波谐振的影响范围,最后研究直流母线中间变换器对其两侧谐波谐振的交互影响规律。

2.1 基于SVD的直流系统谐波谐振分析

基于特征值分解的模态分析法^[8]和基于SVD的谐波谐振分析法^[13]是两种有效分析系统谐波谐振规律的工具,区别在于基于SVD的分析方法适用性更广,SVD也适用于 $M \times N$ 的非方阵,且分解后通常只需关注谐波矩阵的最大奇异值及其相关的左右奇异向量。

令谐波阻抗矩阵 $Z_h = Y_h^{-1}$,则直流系统各节点电压与注入节点的谐波电流源之间的关系为

$$[v_{dc1}, v_{dc2}, \dots, v_{dc32}]^T = Z_h [I_{h,1}, I_{h,2}, \dots, I_{h,11}]^T \quad (16)$$

基于SVD的谐波谐振分析法理论^[13],由 Z_h 的最大奇异值 σ_1 可以确定系统谐波谐振频率及谐振放大强度,根据最大奇异值的左右奇异向量计算得到的参与因子(即影响因子矩阵的对角线元素)可以确定各节点对相关谐振的参与程度,节点 $j(j=1,2,\dots,11)$ 的参与因子的计算公式为

$$PF_j = |u_{j1} w_{1j}| \quad (17)$$

式中: u_{j1}, w_{1j} 分别对应最大奇异值 σ_1 的左奇异向量 u_j 和右奇异向量 w_j 的第 j 个元素。

根据SVD谐波谐振分析方法的思路,首先对图2所示系统的谐波阻抗矩阵 Z_h 进行奇异值分解,系统参数如表1所示。图7所示为谐波阻抗

表1 系统参数

Tab.1 System parameters

参数	变量名称及数值
母线电压	$v_{dc1}=750 \text{ V}, v_{dc2}=400 \text{ V}, v_{dc3}=300 \text{ V}$
DAB参数	$L_m=0.15 \text{ mH}, C_{in}=1000 \mu\text{F}, C_o=800 \mu\text{F}, N=750/400,$ $k_p=0.001, k_i=0.02, v_{in}=750 \text{ V}, v_o=400 \text{ V}$
Boost参数	$L=1 \text{ mH}, C_{pv}=1000 \mu\text{F}, C_o=1500 \mu\text{F},$ $k_p=0.1, k_i=1, V_m=112 \text{ V}, I_m=177 \text{ A}$
Buck ₁ 参数	$L_m=0.5 \text{ mH}, C_o=800 \mu\text{F}, k_p=0.005, k_i=0.05,$ $v_{in}=750 \text{ V}, v_o=300 \text{ V}$
Buck ₂ 参数	$L_m=1 \text{ mH}, C_o=600 \mu\text{F}, k_p=0.003, k_i=1,$ $v_{in}=750 \text{ V}, v_o=400 \text{ V}$
Buck ₃ & Buck ₄ 参数	$L_m=0.5 \text{ mH}, C_o=600 \mu\text{F}, k_p=0.001, k_i=1,$ $v_{in}=400 \text{ V}, v_o=100 \text{ V}, R_{load}=2 \Omega$
Buck ₅ & Buck ₆ 参数	$L_m=0.6 \text{ mH}, C_o=500 \mu\text{F}, k_p=0.001, k_i=1,$ $v_{in}=300 \text{ V}, v_o=72 \text{ V}, R_{load}=1.5 \Omega$
线路参数	$Z_{L11}=0.15 \text{ mH}+0.008 \text{ m}\Omega, Z_{L12}=0.2 \text{ mH}+0.01 \text{ m}\Omega,$ $Z_{L13}=0.4 \text{ mH}+0.02 \text{ m}\Omega, Z_{L14}=0.1 \text{ mH}+0.005 \text{ m}\Omega,$ $Z_{L21}=Z_{L22}=0.2 \text{ mH}+0.01 \text{ m}\Omega,$ $Z_{L31}=Z_{L32}=0.016 \text{ mH}+0.008 \text{ m}\Omega,$ $Z_s=0.5 \text{ mH}+0.02 \text{ m}\Omega$
稳压电容	$C_{12}=200 \mu\text{F}, C_{14}=200 \mu\text{F},$ $C_{21}=C_{22}=180 \mu\text{F}, C_{31}=C_{32}=120 \mu\text{F}$

矩阵 Z_h 最大奇异值随频率变化曲线,由图可知系统存在8个较明显的谐振点,再根据式(17)计算谐振频率下的参与因子以确定最大参与节点,如表2所示。由分析结果可知,在当前参数下系统不同电压等级母线侧均存在谐振点,当出现谐振频率附近的谐波源时系统极易发生谐波放大,造成严重危害。

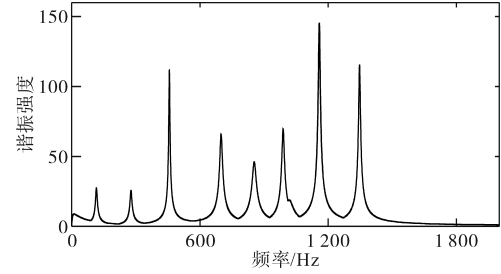


图7 系统谐波谐振强度

Fig.7 System harmonic resonance intensity

表2 系统谐振频率及其最大参与节点

Tab.2 System resonance frequency and maximum participating node

	谐振频率/Hz							
	115.5	277	456.8	698.5	853.8	988.9	1158.1	1346.4
最大参与节点	4	2	10/11	3	7/8	5	10/11	10/11

2.2 多母线直流系统谐振传播规律分析

前面通过分析知道了直流系统谐振频率及其最大参与节点,接下来本文从可激性和可观性角度进一步研究这些谐振对节点电压的影响。

考虑注入节点 k 的谐波电流激励源、节点电压响应以及谐波阻抗矩阵元素之间的关系,如下式所示:

$$\begin{bmatrix} V_{h,1} \\ \vdots \\ V_{h,k} \\ \vdots \\ V_{h,11} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{h,11} & \cdots & Z_{h,1j} & \cdots & Z_{h,111} \\ \vdots & \ddots & \vdots & & \vdots \\ Z_{h,k1} & \cdots & Z_{h,kj} & \cdots & Z_{h,k11} \\ \vdots & & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{h,111} & \cdots & Z_{h,11j} & \cdots & Z_{h,1111} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{h,1} \\ \vdots \\ I_{h,j} \\ \vdots \\ I_{h,11} \end{bmatrix} \quad (18)$$

由式(18)可知:谐波阻抗矩阵 Z_h 第 k 行元素幅值代表在不同节点注入谐波激励对第 k 个节点电压 $V_{h,k}$ 的影响,其物理意义为不同节点施加的电流激励源对电压 $V_{h,k}$ 的影响程度,即可激性;谐波阻抗矩阵 Z_h 第 j 列元素幅值代表在第 j 个节点注入谐波激励 $I_{h,j}$ 对不同节点电压的影响,其物理意义为同一个节点施加电流激励源 $I_{h,j}$ 后在不同节点观测到的电压大小,即可观性。对应可激性和可观性数值越大谐波阻抗矩阵元素幅值越大,代表谐振对相关节点影响也越大。

计算谐振频率下谐波阻抗矩阵对应最大参

与节点的行元素和列元素的幅值,其分别对应可激性和可观性,如表 3 所示。分析表 3 得出以下结论:

1)对应最大参与节点为节点 1~5 的谐振频率下,编号 1~5 的可激性和可观性数值一样大,如对应表 3 中 115.5 Hz 编号 4 位置的可激性和可观性数值均为 8.670,说明节点 1~5 之间满足互易定理,即激励与响应互换位置之后二者比值不变;编号 6~11 的可激性和可观性数值不同,如对应表 3 中 115.5 Hz 编号 6 位置的可激性和可观性数值不同,节点 6~11 与其它节点之间不满足互易定理,这是由于中间变换器 DAB, Buck₁ 的二端口等效阻抗模型不对称造成节点导纳矩阵/谐波阻抗矩阵不对称,从而影响中间变换器两侧节点之间谐波传递强度不对等。

2)对应频率 115.5 Hz, 277 Hz, 698.5 Hz, 988.9 Hz 的谐振可激性和可观性较大的节点编号分别为 4, 2, 3, 5, 说明其主要影响 750 V 直流母线

侧节点;对应频率 853.8 Hz 的谐振可激性和可观性较大的节点编号为 7 和 8, 说明其主要影响 DAB 输出侧 400 V 母线相关的节点;对应频率 1 158.1 Hz, 1 346.4 Hz 的谐振可激性和可观性较大的节点编号均为 10 和 11, 说明其主要影响 Buck₁ 输出侧 300 V 母线相关的节点, 说明谐振的影响范围具有一定区域聚集性。

3)对应频率 456.8 Hz 的谐振可激性和可观性较大的节点编号为 9, 10 和 11, 说明其对中间变换器 Buck₁ 两侧节点均有较大影响, 从其可激性和可观性来看, 中间变换器 Buck₁ 输入侧节点施加 456.8 Hz 的激励源对 Buck₁ 输出侧节点影响较小, 但 Buck₁ 输出侧节点施加 456.8 Hz 的激励源对 Buck₁ 输入侧节点电压影响较大(表 3 中 456.8 Hz 编号 3 位置可观性数值为 34.670, 大于编号 10 或 11 位置可观性数值), 甚至超过对最大参与节点本身电压的影响, 说明 Buck 变换器可能造成谐振跨母线传播时出现劣化。

表 3 系统谐振可激性和可观性

Tab.3 System resonance excitability and observability

矩阵 元素 编号	115.5 Hz		277 Hz		456.8 Hz		698.5 Hz		853.8 Hz		988.9 Hz		1 158.1 Hz		1 346.4 Hz	
	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性	可激 性	可观 性
1	5.936	5.936	5.028	5.028	0.829	3.953	13.417	13.417	0.001	0.002	12.978	12.978	0.001	0.006	0.157	0.770
2	6.450	6.450	9.214	9.214	3.490	16.643	7.098	7.098	0.006	0.021	2.711	2.711	0.0002	0.001	0.016	0.079
3	6.091	6.091	5.947	5.947	7.271	34.670	39.286	39.286	0.007	0.026	27.656	27.656	0.087	0.425	1.628	7.984
4	8.670	8.670	6.132	6.132	0.210	1.003	1.272	1.272	0.000 1	0.001	0.586	0.586	0.000 1	0.000 2	0.004	0.019
5	6.019	6.019	5.569	5.569	0.913	4.351	20.522	20.522	0.001	0.004	49.734	49.734	0.041	0.198	0.392	1.921
6	1.126	0.316	0.682	0.192	0.131	0.175	0.150	0.042	0.534	0.534	0.335	0.094	0.000 1	0.000 1	0.000 4	0.000 8
7	1.151	0.323	0.777	0.218	0.207	0.276	0.427	0.120	23.186	23.186	0.935	0.262	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 5
8	1.151	0.323	0.777	0.218	0.207	0.276	0.427	0.120	22.913	22.913	0.935	0.262	0.000 1	0.000 1	0.000 1	0.000 5
9	2.601	0.548	3.621	0.761	28.212	28.212	11.897	2.483	0.001	0.007	1.974	0.408	0.582	0.582	19.284	19.28 4
10	2.638	0.555	3.861	0.812	32.558	32.558	18.321	3.823	0.002	0.002	7.153	1.480	72.822	72.822	53.970	53.970
11	2.638	0.555	3.861	0.812	32.567	32.567	18.321	3.823	0.002	0.002	7.153	1.480	72.759	72.759	53.884	53.884

2.3 谐波谐振跨母线传播影响因素分析

根据以上分析可知, DAB, Buck 等中间变换器对多母线直流系统中的谐波谐振传播具有很大影响, 接下来基于中间变换器二端口阻抗模型研究谐波谐振在直流母线间跨级传播的影响因素。图 8 所示为中间变换器两侧谐波相互耦合传递示意图, 图中 x 为 D 或 B 时分别代表 DAB 和 Buck 二端口阻抗模型。根据图 8 可知, 当中间变换器左侧存在谐波源并引起其输入端口电压出现谐波畸变时, 输入端口的电压谐波将经变换器耦合传递到其输出端口, 耦合传递强度主要取决

于 N_x ; 当中间变换器右侧存在谐波源并引起其输出端口电流出现谐波畸变时, 输出端口的电流谐波将经变换器耦合传递到其输入端口, 耦合传递强度主要取决于 G_x 。因此, 本文将根据耦合传递系数 N_x, G_x 幅值曲线的频域特性深入分析谐波谐振在直流母线间跨级传播规律。

图 9 所示为耦合传递系数 N_x, G_x 的频域幅值曲线, 从图中可以看出: 1) DAB 和 Buck 变换器耦合传递系数 N_x 幅值小于 G_x , 说明这两种变换器输出侧的谐波更容易对其输入侧产生影响; 2) Buck 变换器耦合传递系数 N_B, G_B 幅值曲线存在谐振尖

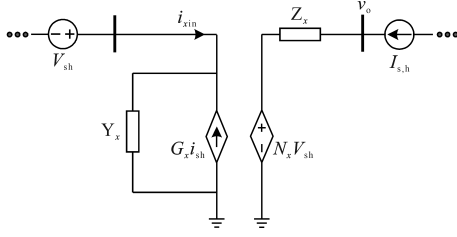


图8 谐波跨级传递示意图

Fig.8 Schematic diagram of harmonic cross level transmission

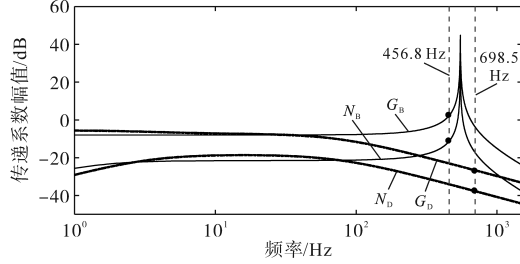


图9 耦合传递系数频域幅值曲线

Fig.9 Frequency domain amplitude curves of coupling transfer coefficient

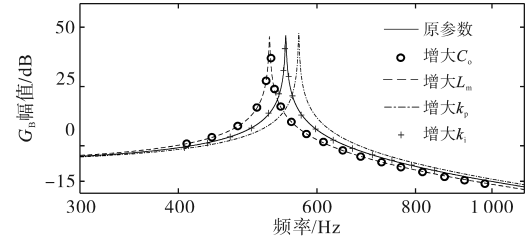
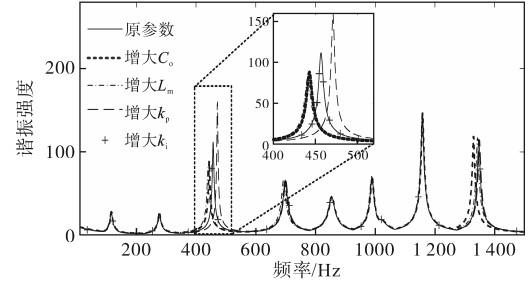
峰,DAB变换器传递耦合系数 N_D, G_D 幅值曲线未出现谐振尖峰,且在Buck变换器耦合系数幅值谐振尖峰附近,幅值明显大于DAB变换器传递耦合系数 N_D, G_D 幅值,说明在该频率附近Buck变换器两侧谐波交互作用强于DAB变换器。

从表3中直流系统谐振的可观性来看,对应最大参与节点为750 V高电压侧母线节点的谐振频率下,低电压侧节点的可观性数值相对较小,如对应115.5 Hz,277 Hz的谐振在编号7,8,10,11等位置的可激性和可观性均相对较小,说明这些谐振对低电压侧节点影响较小;而对应最大参与节点为低电压侧母线节点的谐振频率下,高电压侧节点的可观性数值则可能出现相对较大情况,如对应456.8 Hz的谐振编号3位置的可观性较大,说明该谐振对高电压侧节点影响相对较大。从表3中可激性也能看出,高电压侧相关的谐振频率下低压侧节点的可激性数值相对较大,低电压侧相关的谐振频率下高电压侧节点的可激性数值相对较小,这些现象正是由于耦合传递系数 N_x 幅值小于 G_x 造成的。

值得一提的是,图9中对应456.8 Hz处耦合传递系数 N_b, G_b 的幅值大于698.5 Hz处传递耦合系数 N_D, G_D 的幅值,说明相比非隔离型Buck中间变换器,隔离型DAB中间变换器对其低电压侧的698.5 Hz谐振起到隔离作用。从表3中可激性和可观性来看,对应频率698.5 Hz的谐振的影响范围基本局限在DAB中间变换器低电压侧的节点7

和8,而对应频率456.8 Hz的谐振对Buck中间变换器的两侧节点3和9具有一定程度影响,因而DAB变换器对两侧谐波谐振的交互抑制作用相对较强。

在以上分析基础上,就非隔离型Buck中间变换器的参数对谐波谐振跨级传播影响规律进行深入分析,其中包括元件参数 L_m, C_o 及控制器参数 k_p, k_i 。由于456.8 Hz谐振从Buck低电压侧传输到高电压侧现象较为明显,本文主要考虑参数对耦合传递系数 G_b 及谐振强度的影响,如图10所示,图中参数变化为增大10%。

(a)参数增大10%对耦合传递系数 G_b 的影响

(b)参数增大10%对谐振强度的影响

图10 参数增大10%对耦合传递系数及谐振强度的影响

Fig.10 Effect of increasing parameters by 10% on coupling transfer coefficient and resonance strength

由图10a可知,增大参数 L_m, C_o 会使得 G_b 谐振尖峰向低频段转移,增大参数 k_p 会使得 G_b 谐振尖峰向高频段转移,而增大参数 k_i 几乎对 G_b 谐振尖峰没有影响。因此,可以通过合理增大参数 L_m, C_o 或减小参数 k_p 使得Buck变换器低电压侧特定次谐波处于 G_b 谐振尖峰右侧幅值较小的频段内,从而达到抑制Buck中间变换器低电压侧谐波谐振对其高电压侧影响的目的。

由图10b可知,Buck参数变化对系统谐振频率及谐振强度也存在不同程度的影响,并且可以看出,与Buck中间变换器相关节点的谐振受参数影响较大,其中456.8 Hz谐振受影响最大。由图可知,增大参数 L_m, C_o 会使得谐振频率降低,并且谐振强度也有所下降,增大参数 k_p 则会造成谐振频率和谐振强度上升,而参数 k_i 变化几乎对谐振频率及强度无影响。因此,通过合理调节参数

L_m, C_o, k_p 可以使得系统的谐振避开系统中的谐波源频率,从而避免发生谐振引起的谐波危害。

基于以上分析,本文拟通过优化 Buck 中间变换器参数抑制其低电压侧谐波谐振对高压侧的影响。分别增大 L_m 至 1.5 mH、增大电容 C_o 至 2 800 μ F、减小 k_p 至 0.000 5,得到耦合传递系数 G_B 及谐振强度随参数变化如图 11 所示。

由图 11 可知,参数调整后对应 456.8 Hz 的谐振处于 G_B 谐振尖峰右侧幅值较小的频段内,Buck 中间变换器可以抑制其低电压侧的 456.8 Hz 谐波向高压侧传递;与此同时,系统相应的谐振频率从原来的 456.8 Hz 分别降至 261.7 Hz, 255.8 Hz, 236.2 Hz(可根据谐振的最大参与节点追踪该谐振的新频率)。需要说明的是,尽管新谐振频率出现在 G_B 曲线的谐振尖峰左侧非强抑制频段内,但新频率谐振强度被削弱,即使系统中出现对应新谐振频率的谐波也能被抑制,因此优化 Buck 参数的措施能够有效降低相关的谐波谐振对系统的危害。

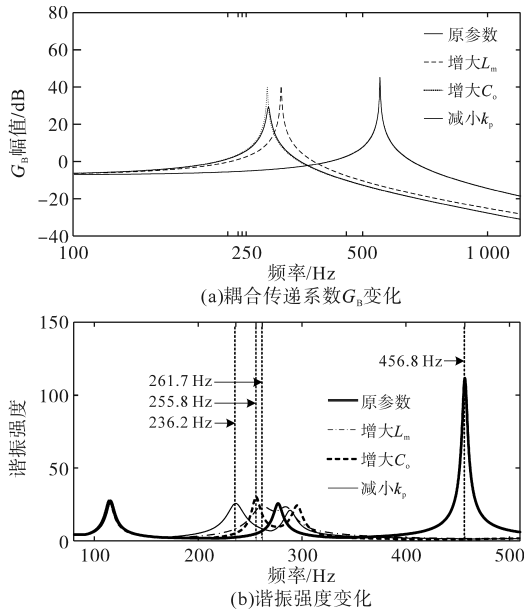


图 11 耦合传递系数及谐振强度随参数变化

Fig.11 Coupling transfer coefficient and resonance intensity vary with parameters

3 多母线直流系统谐波谐振交互仿真验证

为验证本文对多母线直流系统谐波谐振交互分析的正确性和优化中间变换器参数以抑制谐波谐振跨级传播的有效性,在 PSACD/EMTDC 仿真软件中搭建了如图 2 所示的多母线直流系

统,仿真中系统相关参数的设定参见表 1。

由于案例系统中谐振频率较多,本文选取频率为 277 Hz, 456.8 Hz, 583.8 Hz, 1 158.1 Hz 谐振为例进行仿真验证。首先分别在节点 2, 10, 7, 10 注入频率为 277 Hz, 456.8 Hz, 583.8 Hz, 1 158.1 Hz 且幅值为 0.5 A 的电流谐波,谐波注入时刻为 0.45 s,得到节点电压波形及相应的谐波幅值如图 12 所示。由于注入的电流谐波幅值仅为 0.5 A,图中节点电压谐波幅值超过 0.5 V 均可视为被放大。

从图 12 中可以看出,在高电压侧节点 2 注入 277 Hz 谐波后对高电压侧节点电压影响较大,对低电压侧节点影响很小;在 DAB 低电压侧节点 7 注入 583.8 Hz 谐波后仅在 DAB 低电压侧节点出现明显放大,说明 DAB 变换器对两侧谐波谐振的交互抑制作用相对较强;在 Buck 低电压侧节点 10 注入 456.8 Hz 谐波后,Buck 两侧均观察到节点电压谐波放大,且节点 3 的谐波电压幅值甚至大于谐波注入的节点 10,说明该次谐波在 Buck 中间变换器耦合传递作用下对其高电压侧产生了较严重的影响;然而在 Buck 低电压侧节点 10 注入 1 158.1 Hz 谐波对其高电压侧节点几乎未观测到谐波放大,这是因为 1 158.1 Hz 谐波处于 G_B 谐振尖峰右侧幅值较小的频段内,Buck 变换器起到了抑制谐波耦合传递作用。图 12 中仿真结果与前文的理论分析基本一致。

接下来以 456.8 Hz 的谐振频率为例,验证中间变换器参数优化对抑制谐波谐振跨级传播的有效性。图 13a 所示为增大 L_m 至 1.5 mH、增大电容 C_o 至 2 800 μ F、减小 k_p 至 0.000 5 时,在节点 10 注入 456.8 Hz/0.5 A 谐波后各节点电压谐波与原参数时的对比。由图可知,参数调整后 Buck 中间变换器高电压侧节点电压谐波低于其低电压侧节点电压谐波,说明参数优化后可以有效抑制 Buck 中间变换器低电压侧 456.8 Hz 的谐波对其高电压节点的影响,并且系统整体谐波也被极大地削弱。

图 13b 所示分别为增大 L_m 至 1.5 mH、增大电容 C_o 至 2 800 μ F、减小 k_p 至 0.000 5 时,在节点 10 注入新谐振频率(分别对应 261.7 Hz, 255.8 Hz, 236.2 Hz)的谐波。由图可知,相比原参数,参数优化系统即使出现对应新谐振频率的谐波,系统各节点电压谐波放大倍数也明显有所下降,验证了本文理论分析的正确性以及参数优化思路的有效性。

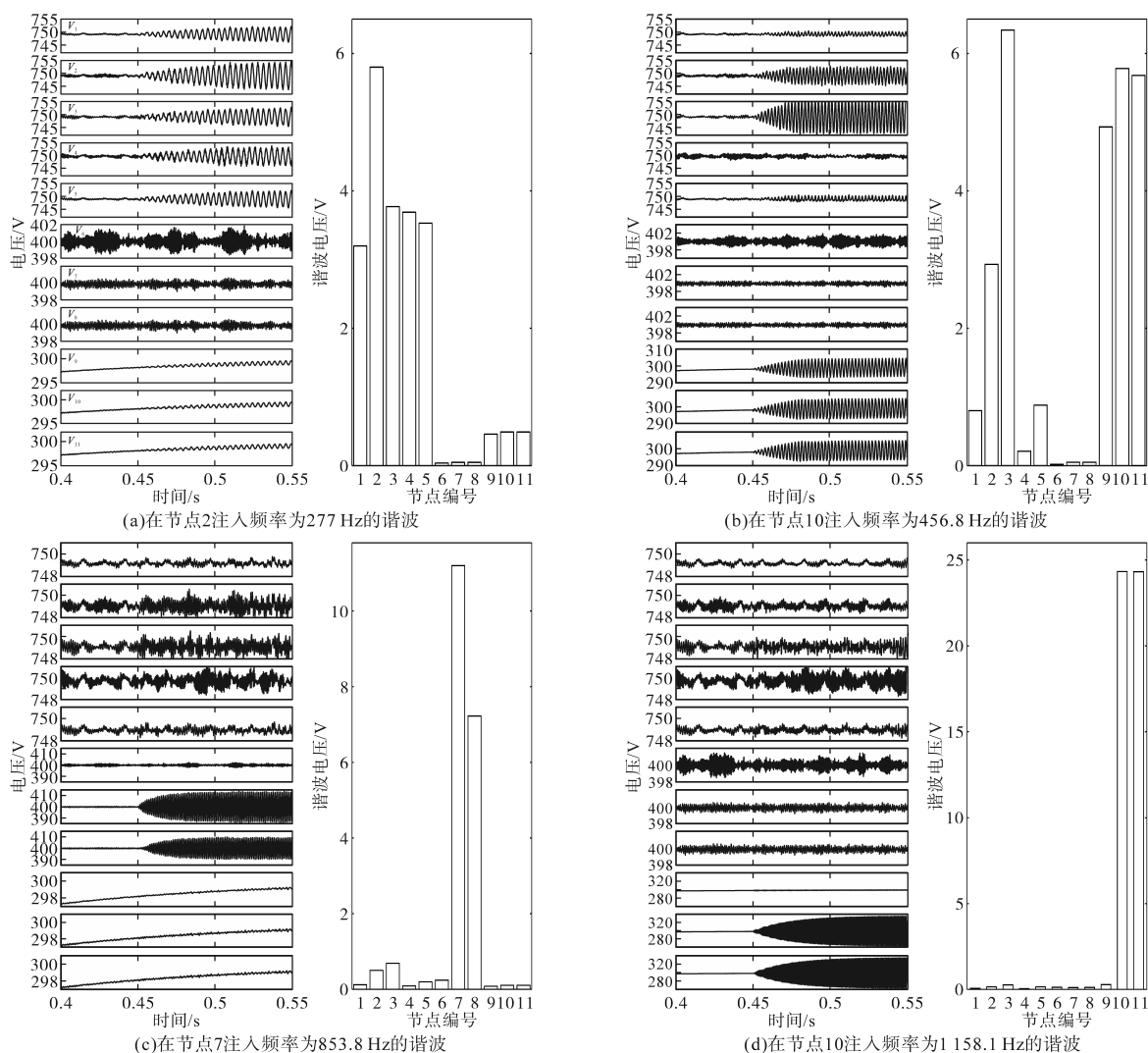


图12 系统中注入谐波后节点电压波形及谐波幅值

Fig.12 Node voltage waveforms and harmonic amplitude value after injecting harmonics into the system

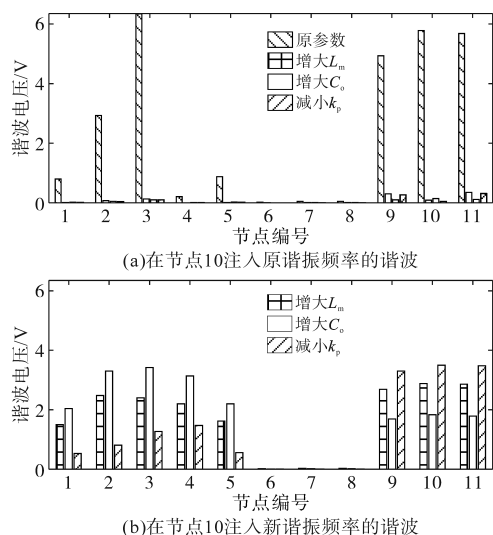


图13 参数优化对耦合传递系数及谐振强度影响

Fig.13 Influence of parameter optimization on coupling transfer coefficient and resonance strength

4 结论

本文构建了计及中间变换器耦合效应的多母线直流系统谐波阻抗模型,研究多母线直流系统谐振交互机理及影响因素,并基于多母线直流系统仿真模型验证了理论分析的有效性。所得研究结论如下:

1) 中间变换器低压输出侧的谐波谐振更容易对其高压输入侧产生影响,因此更需要关注中间变换器低压输出侧出现谐波谐振对系统可能造成的不利影响;

2) 由于非隔离型的Buck变换器耦合传递系数本身存在谐振尖峰,可能造成谐振尖峰频率附近的谐波耦合放大传递到变换器的另一侧,相比之下隔离型DAB变换器对两侧谐波谐振的交互

抑制作用更强;

3)对于谐振交互抑制作用较弱的非隔离型的 Buck 变换器,通过合理增大参数 L_m , C_o 以及减小控制参数 k_p 可有效削弱中间变换器本身谐振造成的因耦合传递出现的谐波放大问题。

参考文献

- [1] 陈国平,王娟,梁桢,等.面向源-荷-储互动的全阻断型直流配网运行研究[J].电气传动,2023,53(3):28-34.
CHEN Guoping, WANG Juan, LIANG Zhen, et al. Operation research on the full fault-blocking converter-based DC distribution network for source-load-storage interaction application[J]. Electric Drive, 2023, 53(3): 28-34.
- [2] 李国胜,向保林.直流配网DC/DC变压器设计与调试[J].电气传动,2021,51(17):28-33.
LI Guosheng, XIANG Baolin. Design and test of DC/DC transformer in DC distribution network[J]. Electric Drive, 2021, 51(17): 28-33.
- [3] 周文,苏灿,胡雪凯,等.直流配电系统电能质量探析[J/OL].电源学报:(2023-02-24)[2024-03-07].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230224.1111.004.html>.
ZHOU Wen, SU Can, HU Xuekai, et al. Analysis of power quality in DC distribution system[J]. Journal of Power Supply: (2023-02-24)[2024-03-17]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/12.1420.TM.20230224.1111.004.html>.
- [4] 陈浩杰,李杨,帅智康,等.多母线级联的海底直流供电系统阻抗建模与稳定性分析[J].电源学报,2025,23(1):151-159.
CHEN Haojie, LI Yang, SHUAI Zhikang, et al. Impedance modeling and stability analysis of multi-bus cascaded subsea DC power supply system[J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(1): 151-159.
- [5] 姚钢,纪飞鹏,殷志柱,等.直流配电电能质量研究综述[J].电力系统保护与控制,2017,45(16):163-170.
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [6] 焦晋荣,贾清泉,王宁,等.柔性直流配电网纹波形成机理与叠加特性[J].电网技术,2017,41(6):1726-1733.
JIAO Jinrong, JIA Qingquan, WANG Ning, et al. Ripple formation mechanism and superimposition characteristics for flexible DC distribution network[J]. Power System Technology, 2017, 41(6): 1726-1733.
- [7] FARHADI M, MOHAMMED O A. Real-time operation and harmonic analysis of isolated and non-isolated hybrid DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(4): 2900-2909.
- [8] 程昆.基于谐波模态分析的交直流混合配电网分布式谐波治理[J].电工技术,2023(1):1-3.
CHENG Kun. Distributed harmonic control of AC/DC hybrid distribution network based on harmonic modal analysis[J]. Electric Engineering, 2023(1): 1-3.
- [9] 李书亚,解绍锋,马智泉.孤岛运行方式下柔性直流配网高次谐波谐振及抑制措施研究[J].电力电容器与无功补偿,2023,44(5):81-88.
LI Shuya, XIE Shaofeng, MA Zhiqian. Research on high order harmonic resonance and suppression measures of flexible DC distribution network under isolated operation mode[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(5): 81-88.
- [10] 林顺富,李寅,戴烨敏,等.考虑谐波耦合的多变流器并网系统建模及交直流谐波交互特性分析[J].电力系统保护与控制,2023,51(10):65-77.
LIN Shunfu, LI Yin, DAI Yemin, et al. Modeling of a multiple grid-connected-converter system considering harmonic coupling and analysis of AC/DC harmonic interaction characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 65-77.
- [11] 张英敏,单鹏,王顺亮,等.模块化多电平换流器交直流侧谐波传导特性研究[J].电网技术,2023,47(8):3406-3416.
ZHANG Yingmin, SHAN Peng, WANG Shunliang, et al. Research on AC/DC side harmonic transfer characteristics of modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3406-3416.
- [12] 王莹鑫,徐永海,陶顺,等.交直流混联配电网谐振交互作用分析[J].电力系统自动化,2023,47(7):74-83.
WANG Yingxin, XU Yonghai, TAO Shun, et al. Resonance interaction analysis for hybrid AC-DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(7): 74-83.
- [13] 李杨,程莹,刘洋,等.基于奇异值分解理论的谐波放大分析方法[J].电力系统自动化,2017,41(8):16-21.
LI Yang, CHENG Ying, LIU Yang, et al. Analytic method of harmonic amplification based on singular value decomposition theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 16-21.
- [14] 刘英培,杨博超,石金鹏,等.含ISOP-DAB变换器的中低压直流配电系统阻抗建模及稳定性分析[J].电力自动化设备,2023,43(2):51-59.
LIU Yingpei, YANG Bochao, SHI Jinpeng, et al. Impedance modeling and stability analysis of MV/LV voltage DC distribution system with ISOP-DAB converter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 51-59.
- [15] AHMADI R, PASCHEDAG D, FERDOWSI M. Closed-loop input and output impedances of DC-DC switching converters operating in voltage and current mode control[C]//IECON 2010-36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, Spa Glendale, AZ, USA: IEEE, 2010: 2311-2316.
- [16] 李晴晴.直流微网光伏接口MPPT变换器的端口阻抗特性及系统稳定性分析[D].马鞍山:安徽农业大学,2017.
LI Qingqing. Impedance properties of photovoltaic interface MPPT converter and system stability for DC microgrid[D]. Ma'anshan: Anhui University of Technology, 2017.

收稿日期:2024-03-17

修改稿日期:2024-06-06