

直流配网用级联DC-DC变换系统稳定性分析

杨国朝,杨朝雯,刘仲英,张宏艳,杨智

(国网天津市电力公司城东供电分公司,天津 300250)

摘要:相较于传统交流配网系统,直流配用电系统凭借着高效、低耗、可靠等特性近些年受到了广泛的关注。其中,作为直流系统中的核心设备,隔离型DC-DC变换器面对着小型化、高效化、稳定性等新的需求,而稳定性对于一个系统而言则至关重要。因此,针对直流微网系统中含谐振拓扑的级联型DC-DC变换器进行研究分析,以LLC+Buck为例采用Middlebrook判据,通过比较LLC与Buck的输出和输入阻抗,对该级联系统的稳定性加以判定。在此基础上,提出改进型的系统参数设计方法。通过Pisim和Matlab等仿真软件的仿真结果证明了基于Middlebrook判据以及所提出参数设计方法具有很好的效果。最终,基于所提出的参数设计方法所获得的参数建立对应1 000 W试验样机,验证变换器的高效、可靠、稳定运行以及理论的准确性。

关键词:直流微电网;Middlebrook判据;LLC谐振变换器;稳定性;小信号模型

中图分类号:TM46;TM28 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd22528

Stability Analysis of Cascaded DC-DC Converter System for DC Distribution Network

YANG Guochao, YANG Zhaowen, LIU Zhongying, ZHANG Hongyan, YANG Zhi

(State Grid Tianjin Chengdong Electric Power Supply Company, Tianjin 300250, China)

Abstract: Compared with the traditional AC distribution network system, DC power distribution system with high efficiency, low consumption, reliability and other characteristics has been widely concerned in recent years. As the core equipment of DC system, isolated DC-DC converter has to face the new requirements of miniaturization, high efficiency and stability. Among them, stable and reliable application is more important. Therefore, the cascaded DC-DC converter with isolated resonant topology in DC microgrid system was studied and analyzed. Taking LLC+Buck as an example, the stability of the cascaded DC-DC system was determined by comparing the output and input impedances of LLC resonant structure and Buck converter by using the Middlebrook criterion. On this basis, an improved system parameter design method was proposed. The method based on Pisim and Matlab was proved to be effective. Finally, based on the parameters obtained by the proposed parameter design method, the corresponding 1 000 W prototype was established to verify the efficient, reliable and stable operation of the converter and the theoretical accuracy.

Key words: DC microgrid; Middlebrook criterion; LLC resonant converter; stability; small signal model

随着分布式能源技术的不断发展,如光伏、风能等越来越多的新能源以及锂电池和超级电容等储能环节被应用在电网系统中,可以预见,未来电网配用电系统中源-储-荷多为直流的用电形式。同时由于电力电子技术的不断突破,使得电力电子设备的成本与体积不再成为构建直流电网系统的限制。因此,随着电力电子技术的发展,直流配用电技术经济优势逐渐显著,采用直流配用电系统可有效减少传统交流系统中不可避免的整流和逆变等功率变换环节,从而避免了其中产生的损

耗,提高了共用电系统的能效。因此,直流电网系统相关领域具有广泛的研究空间和发展应用潜力,受到了世界各国学者的重视^[1-3]。

目前,直流微电网典型结构如图1所示。从图中可以看出,风电、光伏以及新能源汽车等系统源和储能单元产生的功率流通过前级直流变换器首先汇集到直流母线统一电压,再通过DC-DC将电能传输给直流用电负荷。而这种双级DC-DC变换器的级联型结构可能会引起系统内部输出电压不稳定现象,影响系统可靠工作

基金项目:天津电力科技项目(KJ20-1-09)

作者简介:杨国朝(1988—),男,大学本科,工程师,Email:yangguochao2012@163.com

运行。

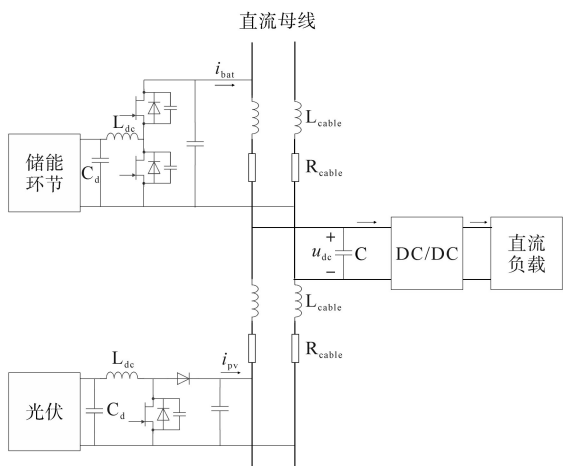


图1 直流微电网典型结构

Fig.1 DC microgrid typical structure

文献[4-5]阐述了可用于判定级联直流变换器结构稳定性的主要判据,即Middlebrook判据,从而通过该方法可以判定级联系统的稳定性,保证系统可靠运行。在此基础上,利用该判据也可以进一步优化级联型谐振变换器的参数优化设计并保证系统的动态性能。而LLC谐振变换器凭借其软开关特性,具有高增益、高效、高功率密度的应用潜力以及电气隔离的安全保障等优势越来越受到学者的广泛关注。其应用范围也在逐步扩大,近些年已经被应用于直流微网系统之中。因此,作为级联DC-DC的前级变换器可以很好地发挥其优势,具有很好的应用潜力^[6-7]。

为了适应更多的应用负载电压等级,采用Buck变换器作为级联变换器的后级进行具体的调压应用。而对于较为成熟的Buck变换器,其稳定性的研究自然受到学者的重视。文献[8-9]针对Buck变换器进行了细化研究,建立了对应模型,详细分析了对变换器稳态输出有影响的干扰因素及其作用。文献[5]详细介绍了计算Buck变换器和半桥变换器的输入、输出阻抗的方式。

本文仅以单输入单输出的级联DC-DC功率变换系统为研究对象,以LLC为前级变换器,Buck拓扑为后级变换器为例展开分析。其中,后级Buck变换器通过变占空比调压来实现用电负荷的多电压等级用电需求,而前级LLC拓扑则用高压直流侧的高增益变换为Buck提供低压母线电压,采用在谐振频率点附近工作,避免波形畸变带来的无功损耗,从而使系统获得较高的工作效率。以LLC+Buck为例进行说明,介绍了含有隔离型谐振拓扑的级联DC-DC变换器的建模方

法、稳定性分析方法及参数设计优化方法。采用Pisim和Matlab等电力电子仿真软件进行验证,最终通过样机验证理论分析及参数设计方法的有效性,可有效提高直流配用电系统的稳定性。

1 LLC+Buck级联拓扑

作为直流配用电系统的关键核心设备DC-DC变换器需要具有高效、稳定等特征,同时还应尽可能地提高设备的功率密度,满足用户小型化的需求节省空间成本。因此,本文选用LLC-Buck级联型拓扑作为研究目标,如图2所示。一方面前级LLC具有电气隔离的特性保证使用安全,同时可实现变换器高增益和高效功率变换;另一方面,后级Buck可通过灵活地占空比调节实现低电平宽范围电压调节。

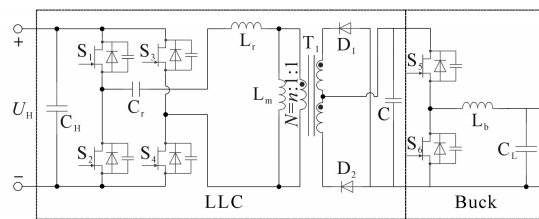


图2 LLC-Buck级联型拓扑仿真结构

Fig.2 LLC-Buck cascaded topology simulation structure

图2中LLC结构由高压逆变全桥 $S_1\sim S_4$ 、推挽结构 $D_1\sim D_2$ 、谐振电感 L_r 、谐振电容 C_r 以及变压器 T_1 构成;Buck结构由开关管 $S_5\sim S_6$ 、储能电感 L_b 以及低压滤波电容 C_1 构成; C_{H1} 、 C 分别为高压稳压电容和LLC输出稳压电容; L_m 为变压器 T_1 的励磁电感; U_{ii} 、 U_{ii} 分别为输入高压和输出低压。

2 Buck电路输入阻抗分析

Buck电路作为后级用于精确输出调压的变换器,根据Middlebrook判据描述,其输入阻抗对于整个系统的稳定性判定具有重要意义。因此,给出典型Buck电路等效小信号模型如图3所示。

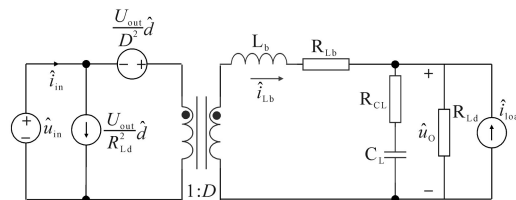


图3 Buck电路小信号模型

Fig.3 Small signal model of Buck circuit

从图3中可以看出,系统所涉及的扰动包括Buck输入电压扰动 \hat{u}_{in} 、占空比扰动 \hat{d} 以及负载电流扰动 \hat{i}_{load} 。根据叠加定理,可以获得对应的等效

结构如图4所示。

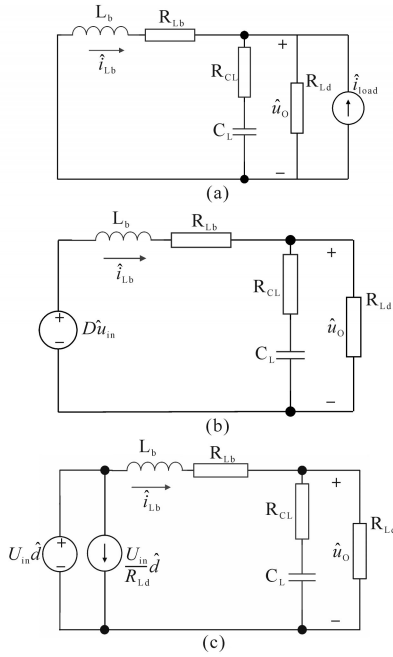


图4 Buck电路小信号模型等效结构

Fig.4 Small signal model equivalent structure of Buck circuit

图4a中,将 \hat{d} 和 \hat{u}_{in} 置0获得变换器开环工作电路,不难得到对应的输出阻抗为

$$Z_{out} = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{i}_{load}(s)} = -1 / \left(1 + \frac{C_L L_b s^2 + C_L R_{Lb} s}{C_L R_{CL} s + 1} + \frac{L_b s + R_{Lb}}{R_{Ld}} \right) \quad (1)$$

图4b将 \hat{d} 和 \hat{i}_{load} 置0获得中给出结构,可以得到 \hat{u}_{in} 与 \hat{u}_o 的增益关系 G_{vg} ;对应的图4c中将 \hat{u}_{in} 和 \hat{i}_{load} 置0,可以获得 \hat{d} 与 \hat{u}_o 的对应关系 G_{vd} ,分别如下式所示,其中 Z 为中间变量。

$$\begin{cases} G_{vg} = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{u}_{in}(s)} = \frac{DZ}{Z + L_b s + R_{Lb}} \\ G_{vd} = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{U_{in} Z}{Z + L_b s + R_{Lb}} \\ Z = \frac{R_{Ld} R_{CL} C_L s + R_{Ld}}{C_L R_{Ld} s + R_{CL} C_L s + 1} \end{cases} \quad (2)$$

最终,可以获得 \hat{u}_o 与各扰动的关系如下:

$$\hat{u}_o = Z_{out} \hat{i}_{load} + G_{vg} \hat{u}_{in} + G_{vd} \hat{d} \quad (3)$$

同理,可得电感电流 \hat{i}_{Lb} 与各扰动的关系如下:

$$\begin{cases} \hat{i}_{Lb}(s) = \frac{Z_{out}(s)}{L_b s} \hat{i}_{load} + G_{ig}(s) \hat{u}_{in} + G_{id}(s) \hat{d} \\ G_{ig} = \frac{\hat{i}_{Lb}(s)}{\hat{u}_{in}(s)} = \frac{D}{Z + L_b s + R_{Lb}} \\ G_{id} = \frac{\hat{i}_{Lb}(s)}{\hat{d}(s)} = \frac{U_{in}}{Z + L_b s + R_{Lb}} \end{cases} \quad (4)$$

最终获得开环输入阻抗为

$$\begin{cases} Z_{in}(s) = \frac{\hat{u}_{in}(s)}{\hat{i}_{in}(s)} \Big|_{\hat{d}(s)\hat{i}_{load}(s)=0} = \frac{1}{DG_{ig}} \\ \hat{u}_{in}(s) = \frac{i_L(s)}{G_{ig}} \\ \hat{i}_{in}(s) = Di_L(s) \end{cases} \quad (5)$$

Buck电路电压闭环控制框图如图5所示。根据上述所得各信号传递函数,并结合图5可以获得闭环输出和输入阻抗,如下式:

$$\begin{cases} Z_{out_BuckCL}(s) = \frac{\hat{u}_o(s)}{\hat{i}_{load}(s)} \Big|_{\hat{u}_{in}(s)=0} = \frac{Z_{out}(s)}{1 + H(s)G_c(s)G_{vd}(s)R_f} \\ Z_{in_BuckCL}(s) = \frac{\hat{u}_{in}(s)}{\hat{i}_{in}(s)} \Big|_{\hat{i}_{load}(s)=0} = Z_{in}(s) \left[\frac{1 + H(s)G_c(s)G_{vd}(s)R_f}{1 - \frac{H(s)G_c(s)G_{vd}(s)R_f}{R_{Ld}DG_{ig}}} \right] \end{cases} \quad (6)$$

式中: $H(s)$ 为对应反馈传函; $G_c(s)$, R_f 为对应增益。

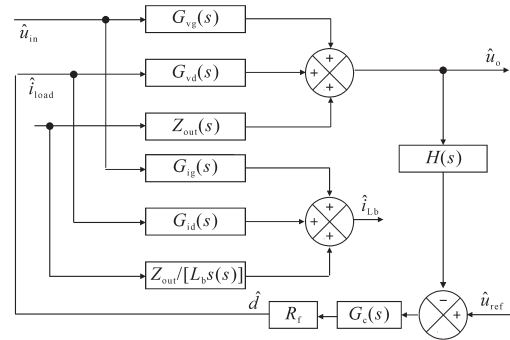


图5 Buck电路电压闭环控制模型图

Fig.5 Model diagram of Buck circuit voltage closed-loop control

3 LLC输出阻抗分析

为了更好地分析级联系统的整体稳定性,采用相同的方法,需要对LLC拓扑进行分析,建立对应的等效小信号模型^[10-13],并计算其输入阻抗。由于LLC拓扑较之与Buck结构较为复杂,得到其稳态等效电路如图6所示。

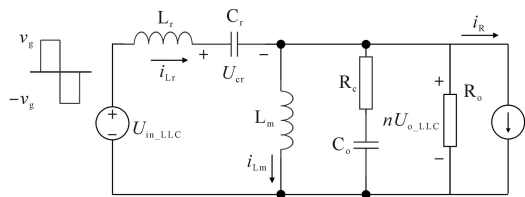


图6 LLC基波等效稳态模型

Fig.6 LLC fundamental wave equivalent steady state model

图6中, $U_{in,LLC}$ 为等效基波输入电压,其波形

如 v_g 所示。 i_{Lr} 为谐振腔电流, i_{Lm} 为变压器励磁电流, $U_{o,LLC}$ 为交流等效输出电压, U_{cr} 为谐振电容电压, R_c 为滤波电容等效串联电阻, R_o 为等效基波负载。根据基波等效分析理论,非线性变量可以近似等效为直流分量或基波分量。当 LLC 谐振变换器稳态运行时,由基波等效分析方法和基尔霍夫电压电流定律可以近似推出 LLC 大信号模型的状态方程为

$$\begin{cases} L_r \left(\frac{di_{Lrs}}{dt} - \omega_s i_{Lrc} \right) + v_{1s} + L_m \left(\frac{di_{Lms}}{dt} - \omega_s i_{Lmc} \right) = \frac{4}{\pi} \sin\left(\frac{\pi}{2}d\right)v_g \\ L_r \left(\frac{di_{Lrc}}{dt} + \omega_s i_{Lrs} \right) + v_{1c} + L_m \left(\frac{di_{Lmc}}{dt} + \omega_s i_{Lms} \right) = 0 \\ L_m \left(\frac{di_{Lms}}{dt} - \omega_s i_{Lmc} \right) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{i_{Lrs} - i_{Lms}}{i_p} v_{Co} \\ L_m \left(\frac{di_{Lmc}}{dt} + \omega_s i_{Lms} \right) = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{i_{Lrc} - i_{Lmc}}{i_p} v_{Co} \\ C_r \left(\frac{dv_{Crs}}{dt} - \omega_s v_{Crc} \right) = i_{Lrs} \\ C_r \left(\frac{dv_{Crc}}{dt} + \omega_s v_{Crs} \right) = i_{Lrc} \\ \left(1 + \frac{R_c}{R_o}\right) C_o \frac{dv_{Co}}{dt} + \frac{nv_o}{Ri} = \frac{2}{\pi} i_p - i_R \end{cases} \quad (7)$$

式中: $i_{Lrc}, i_{Lrs}, i_{Lms}, i_{Lmc}$ 分别为谐振电感电流与励磁电流的正弦分量与余弦分量; v_{Crs}, v_{Crc} 为谐振电容电压的正弦分量与余弦分量; v_{Co} 为输出电容电压。对应的输出方程式如下:

$$\begin{cases} nv_o = \frac{R_c R_o}{R_c + R_o} (|i_{Lr} - i_{Lm}| - i_R) + \frac{R_o}{R_o + R_c} v_{Co} \\ i_g = \frac{1}{T} \int_0^T i_{Lr} \frac{v_{ab}(t)}{v_g} dt \end{cases} \quad (8)$$

结合 LLC 的大信号数学模型和输出方程得到对应的稳态解。同时,加入对应的扰动量,即可获得 LLC 的等效小信号模型,如图 7 所示。

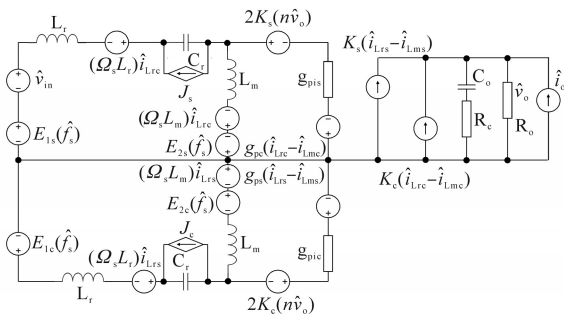


图7 LLC小信号等效模型

Fig.7 LLC small signal equivalent model

闭环控制框图如图 8 所示。按照分析 Buck

电路相同的方法得到对应信号的传递函数。根据所得传递函数。图 8 得到 LLC 的电压闭环输出阻抗如下:

$$Z_{out,LLC_CL}(s) = \left. \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{i}_o(s)} \right|_{\hat{i}_g(s)=0} = \frac{Z_{out}}{1 - H(s)G_{ef}(s)G_{vf}(s)} \quad (9)$$

式中: $G_{ef}(s), G_{vf}(s)$ 为对应的参数增益传递函数。

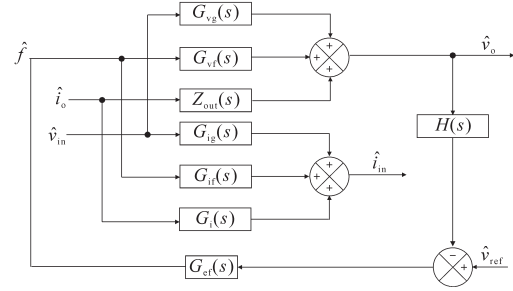


图8 LLC闭环电压控制框图

Fig.8 LLC closed loop voltage control block diagram

4 级联系统稳定性与参数设计

在满足前级 LLC 谐振变换器和后级 Buck 都能各自稳定的情况下,级联系统也仍然会出现不稳定的现象^[5]。根据前文所提及的 Middlebrook 判据,在本系统中即可表示为

$$|Z_{out,LLC}| \leq |Z_{in,Buck}| \quad (10)$$

因此,基于该稳定判别标准同时结合前文分析所得的 Buck 输入阻抗和 LLC 输出阻抗,如式(6)、式(10),可以获得新的参数设计限制条件以保证系统的整体稳定性,并建立对应的参数设计方法如图 9 所示。参数设计流程如下:

- 1) 根据需求输入输出电压,确定变压器的匝比;
- 2) 基于额定工作状况下实现 ZVS 所需时间最短时间以及死区时间需求确定 L_m 的取值范围;
- 3) 根据变换器应用的增益需求和工作频率确定 L_r 和 C_r 的取值变化范围;
- 4) 基于 GaN 特性获得同步整流死区时间;
- 5) 基波等效分析法建立谐振变换器稳态分析模型;
- 6) 基于功率级和电压确定后级电路中的对应参数的取值范围;
- 7) 推导出前级谐振拓扑的输出阻抗和后级拓扑的输入阻抗,并基于 Middlebrook 判据,建立稳定性限制条件。

8) 根据所得数学模型以及应用需求建立对应的 M, f_r , 输出, 输入电压, φ , ZVS 实现以及稳定

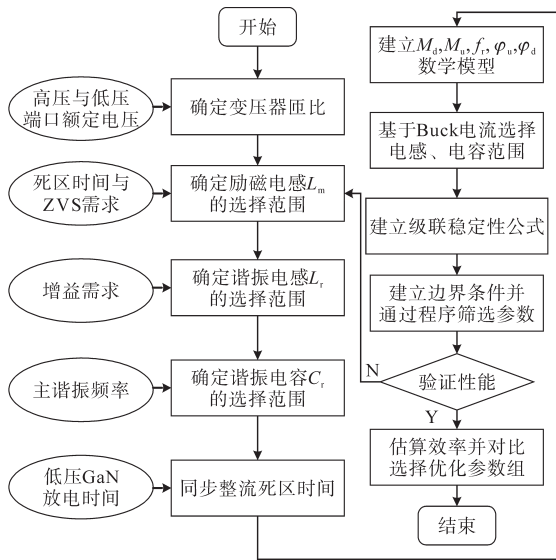


图9 参数设计流程图

Fig.9 Program of parameter design

性等限制条件,在Matlab中建立程序进行轮寻筛选,寻找符合应用需求的参数组;

9)记录所有符合条件的参数组,并验证参数特性是否真正满足需求;

10)基于所得参数组,以效率为优化目标,分别计算获得最优的参数组。

最终获得对应的变换器设计参数如下: $L_r=5 \mu\text{H}$, $C_r=20 \text{ nF}$, $L_m=100 \mu\text{H}$, $n=7.8:1:1$, $v_{in}=375 \text{ V}$, $C_o=200 \mu\text{F}$, $R_c=0.15 \text{ m}\Omega$, $L_b=1.2 \mu\text{H}$, $R_{Lb}=1 \text{ m}\Omega$, $C_L=100 \mu\text{F}$, $R_{CL}=0.3 \text{ m}\Omega$, $f_{LLC}=500 \text{ kHz}$, $f_{Buck}=400 \text{ kHz}$ 。

5 仿真与实验

基于参数设计所得的对应参数搭建级联型变换器电力电子仿真模型,并进行仿真与实验验证。两级DC-DC输出输入阻抗对比图如图10所示。

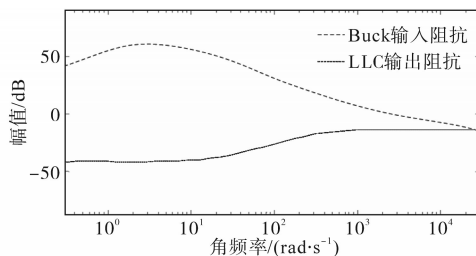


图10 两级DC-DC输出输入阻抗对比图

Fig.10 Comparison of open-loop output and input impedance of cascaded DC-DC

从图10的级联DC-DC输出输入阻抗对比图

中可以看出,在通过加入稳定性限制条件后所得的变换器参数具有良好的稳定运行效果。

对应的实验波形如图11所示,图11a中 V_{LLC} , V_{Buck} 分别为LLC和Buck拓扑的输出电压,可以看到其输出稳定性。图11b为LLC拓扑中高压开关管的ZVS软开关示意图,虚线圈内部分可以明显看出软开关的实现。 i_{Lr} 为 L_r 的谐振电流, V_{S1_GS} 为开关管 S_1 的驱动电压, V_{S1_DS} , V_{S2_DS} 则分别为 S_1 和 S_2 开关管的源漏极电压。

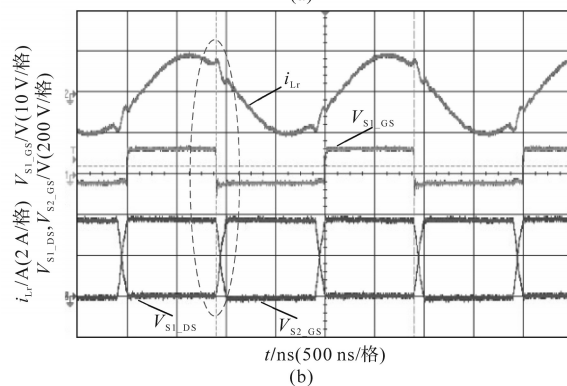
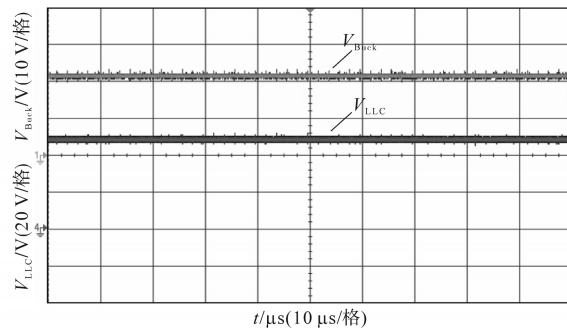


图11 两级DC-DC实验波形

Fig.11 Cascade DC-DC experimental waveforms

从实验中可以看出变换器具有良好的软开关特性及输出电压稳定性。保证了变换器的高效稳定运行,同时验证了前文理论分析的准确性和正确性。

6 结论

本文主要针对直流配用电系统中所涉及的双级DC-DC变换系统稳定性进行分析。以LLC-Buck的拓扑结构为例,基于Middlebrook判据进行具体的建模分析,详细地给出了Buck以及LLC的小信号建模过程,得到对应的输入输出阻抗。在此基础之上,提出了优化的参数设计方法,并结合Matlab仿真软件与实验验证了系统的稳定性与理论的正确性。

(下转第35页)

了交流窜入直流故障的检测时效性,减少了检测工程的查找量,解决了现有技术中存在的工程量大、时效性差的问题,下一步将围绕减小新型主动式保护装置经济成本的问题进行相关研究,并将该保护装置拓展应用到站用直流电源系统中其他故障的解决方案上。

参考文献

- [1] 薛士敏,陈超超,金毅,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(19):3114-3122.
- [2] 宋强,赵彪,刘文华,等. 智能直流配电网研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):9-19.
- [3] 胡竟竟,徐习东,裘鹏,等. 直流配电系统保护技术研究综述[J]. 电网技术,2014,38(4):844-851.
- [4] 杨涛,黄晓明,李忠,等. 变电站新型直流系统及其控制保护策略[J]. 电气应用,2017(24):48-54.
- [5] 刘玉富. 交流窜入直流系统故障分析[J]. 电工技术,2016(11):71,77.
- [6] Ji Yuganh, Li Yitong, Shi Chuan. Aspect rating prediction based on heterogeneous network and topic model[J]. Journal of Computer Applications, 2017,37(11):3201-3206.
- [7] 黄晓明,杨涛,邹学毅. 直流系统主动式接地保护装置研究与开发[J]. 供用电,2016,33(3):19-24.
- [8] 李应文,彭明智,张纯. 变电站直流电源系统直流环网与交流窜入的原因及危害[J]. 自动化与仪器仪表,2018(7):57-60.

- [9] 中国南方电网责任有限公司. Q/CSG1203003—2013. 变电站直流电源系统技术规范[S]. 广东:中国南方电网有限责任公司,2013.
- [10] 吴鸣,刘海涛,陈文波,等. 中低压直流配电系统的主动保护研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(4):891-899.
- [11] 孙婉胜,张海梁. 基于单片机的交流窜入直流系统监测装置设计与实现[J]. 电工技术,2018(8):117-118.
- [12] 乔国栋. 直流系统主动式交流窜入保护装置的研究[J]. 电工技术,2018(13):74-75,77.
- [13] Chen W, Cui X. Foreword for the special section on AC and DC ultrahigh voltage technologies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015,1(3): 1-2.
- [14] Li X, Cui X, Lu T, et al. Comparison between the audible noises generated from single corona source under DC and AC corona discharge[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2015,1(3):23-30.
- [15] 徐玉凤,张焕清. 交流窜入直流电源故障分析与检测[J]. 供用电,2015(2):28-30.
- [16] 杨超余,陈达民,杨磊. 变电站交流窜入直流报警与录波的研究[J]. 电力科学与工程,2015,31(12):39-42.
- [17] 严海健,冯健棠,林康熙,等. 交直流窜电引起高压直流系统双极相继闭锁事件分析及防控[J]. 电工技术,2018(7):43-45,48.
- [18] 尉镔. 交流窜入直流系统故障的试验与研究[J]. 电力科学与工程,2013,29(3):29-32.

收稿日期:2020-04-27

修改稿日期:2020-06-09

(上接第28页)

参考文献

- [1] 刘海涛,熊雄,季宇,等. 直流配电系统不同运行模式下扁平化管理与协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(8):37-46.
- [2] 熊雄,季宇,李蕊,等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6802-6813.
- [3] Guo L, Feng Y B, Li X L, et al. Stability analysis of a DC microgrid with master-slave control structure[C]// Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014.
- [4] 陈小平. 级联直流分布式电源分析与设计[D]. 南京:南京航空航天大学,2007.
- [5] 任小永,阮新波. 适用于高压输入低压输出的两级式变换器[J]. 中国电机工程学报,2005,25(23):153-157.
- [6] Jung J H, Kim H S, Ryu M H, et al. Design methodology of bidirectional CLLC resonant converter for high-frequency isolation of DC distribution systems[J]. Power Electronics IEEE Transactions on, 2013,28(4):1741-1755.

- [7] 殷起明,王志刚,周玲,等. 全桥 LLC 谐振变换器的轻载时域模型[J]. 电力电子技术,2019,53(12):4-8.
- [8] 吴涛,阮新波. 分布式供电系统中负载变换器的输入阻抗分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(12):20-25.
- [9] 吴涛,阮新波. 分布式供电系统中源变换器输出阻抗的研究[J]. 中国电机工程学报,2015,28(3):66-72.
- [10] Chang C H, Cheng H L, Chang E C, et al. Modeling and design of the LLC resonant converter used as a solar-array simulator[C]// Industrial Electronics & Applications, IEEE, 2012.
- [11] 梁昊,张军明. 一种简化的 LLC 谐振变换器小信号分析方法[J]. 电力电子技术,2011,45(10):71-72.
- [12] 胡广莉,王定中. LLC-型串并联谐振变换器小信号电路模型[J]. 华南师范大学学报(自然科学版),1995(4):17-24.
- [13] 张书槐,闫海云,王议锋,等. 光伏微电网中串联 DC-DC 变换系统稳定性研究[J]. 电气传动,2016,46(6):11-14.

收稿日期:2020-10-11

修改稿日期:2020-11-15