

# 直流微电网系统中双向 DC-DC 变换器的有源阻抗优化技术研究

张琦<sup>1,2</sup> 王一飞<sup>1</sup> 戴伟<sup>2</sup> 刘菲菲<sup>2</sup> 何艳荣<sup>2</sup>

(1. 西安理工大学电气工程学院 陕西省西安 710048; 2. 新疆希望电子有限公司博士后科研工作站 新疆乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 传统阻抗分析法通常采用近似的源阻抗模型评估系统的抗扰动性能, 忽略了延迟环节对等效阻抗带来的影响。针对该问题, 本文对直流微电网中储能支路系统等效输出阻抗结构模型进行了分析, 研究了电流内环控制增益、数字控制延迟、开关延迟等在支路系统等效源阻抗中的耦合特征, 以及这些因素对负载电流前馈控制有效作用带宽的制约机理。进而在电流内环控制中引入了相位补偿环节, 从而在拓展内环作用带宽以及改善电压外环稳定裕度的同时, 优化了系统等效输出阻抗。最后, 通过相关的实验验证了所提出的阻抗模型及阻抗优化方法理论分析的正确性。

**关键词:** 输出阻抗; 延时补偿; 电流前馈

## 0 引言

光-储直流微电网是一种典型的直流微电网形式, 分布式电源的间歇性与用电负荷类型的随机性对系统的稳定运行带来挑战<sup>[1]</sup>。公共直流母线是各单元能量交互的桥梁, 直流母线电压的稳定度是直流微电网安全与稳定运行的重要评价指标<sup>[2]</sup>。为了减小公共直流母线电压的波动, 直接的方式是增加母线电容容量, 然而电容容量的选取受到成本、体积、重量、使用寿命等限制<sup>[3]</sup>。因此, 不增加母线电容容量前提下实现直流母线电压波动的有效抑制具有重要的理论与工程价值<sup>[4]</sup>。

为了满足系统的灵活扩容需求, 储能支路期望具备即插即用的特质, 因此, 各模块常采用电压下垂控制技术进行主动能量管理<sup>[5]</sup>。另外, 针对具体的负载扰动特征, 可对固定频率点扰动进行补偿<sup>[6]</sup>, 或提高对应扰动频率点增益以应对负载扰动。由于下垂参数的调节必须满足系统整体的稳定性要求, 特别是在 CPL 等非线性负载条件下需要讨论结合虚拟阻抗技术优化电源层阻抗以满足稳定性要求, Middlebrook 阻抗判据为阻抗优化方向提供了指标依据<sup>[7]</sup>。通常情况下, 由于能量波动所处的频带相对较低, 上述控制方法在进行电压波动抑制的环路设计中常忽略双向变换器电流内环控制器、数字控制延迟、开关延迟等在源阻抗中的耦合特征, 甚至将积分控制引入电流内环控制, 这在很大程度上限制了电压环路以及各种扰动补偿方法的作用带宽与补偿效果。

本文在考虑了这些耦合因素的基础上, 以传统非隔离型双向变换器为拓扑平台, 首先分析了储能支路等效输出阻抗特征; 其次, 分析了电流内环控制增益在负载电流前馈控制中的耦合特征; 并利用对电流控制器的改进, 改善扰动补偿控制方法的作用效果, 进而优化系统储能支路的输出阻抗特征; 最后, 采用仿真与实验的方法对分析内容与阻抗优化方法进行了验证。

## 1 储能支路系统的频域阻抗模型分析

以如图 1 所示的双向 DC-DC 拓扑为能量变换单元, 将储能介质连接至公共直流母线。为了简化分析, 忽略线路阻抗, 元器件均视为理想器件。 $v_{dc}$  是直流母线电压,  $v_{in}$  是储能侧电压,  $T_{bo}$  和  $T_{bu}$  是变换器的功率开关管。为了能让电感电流  $i_L$  在工作过程中具有良好的连续性,  $T_{bo}$  和  $T_{bu}$  工作在互补模式。 $i_o$  是输出到母线的电流, 通过控制  $i_i$  可调节储能装置与母线间的交互能量。

简化为如图 2 所示的结构。其中, 控制周期与开关周期一致为  $T_s$ , 数字控制延迟为  $e^{-Ts}$ , 开关等效延迟环节为  $e^{-0.5Ts}$  或为零阶保持器 (ZOH)。 $G_{vc}(s)$  为电压调节器,  $G_{ic}(s)$  为电流调节器, 给定母线电压值为  $v_{dc,ref}$ , 负载扰动电流为  $i_d$ 。在图 2 所示的频域模型基础上, 可以获得系统的  $z$  域模型。为拓宽系统工作频带, 内环通常采用比例控制或状态反馈控制, 采用比例控制时, 若比例控制系数为  $k_{pi}$ , 则在考虑到综合延时特征情况下, 电流内环传递函数可以写为式 (1)。

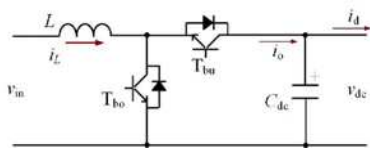


图 1 双向 DC-DC 拓扑电路拓扑

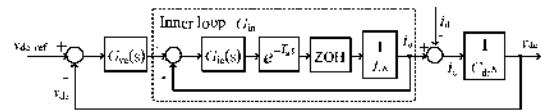


图 2 双向 DC-DC 电路控制频域系统结构图

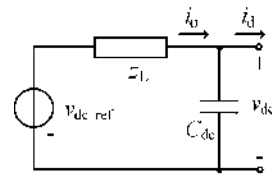


图 3 等效阻抗模型

$$G_{in}(z) = \frac{\beta}{z^2 - z + \beta} \quad (1)$$

式 (1) 中,  $\beta = (k_{pi}T_s)/L$ 。根据图 2 可获得储能支路系统的整体等效电路结构图, 如图 3 所示。其中  $z_o$  是由控制器结构及参数向支路系统引入的等效输出阻抗, 其  $z$  域模型可以写为:

$$z_L(z) = r_d G_{in}^{-1}(z) \quad (2)$$

显然, 系统的等效输入阻抗  $z_o$  可以表示为如式 (3) 所示, 其中  $z_{c,dc}$  为  $C_{dc}$  的阻抗表达式。可见, 源介质特征与  $C_{dc}$  值一定时, 内环特征决定了  $z_o$ 。

$$z_o(z) = \frac{z_L \cdot z_{c,dc}}{z_L + z_{c,dc}} \quad (3)$$

$z_L$  的频域特征如图 4 所示, 可见  $z_L$  的相位特征在  $L/6$  ( $f = 1/T_s$ ) 频率处总是与  $180^\circ$  相交, 所以  $z_L$  在该频率附近总体体现为负阻抗特征。随着  $\beta$  值的增加,  $z_L$  的阻性频带加宽, 但其负阻抗特征更加严重。由公式 (1) 可知, 要使内环稳定, 则  $\beta < 1$ 。另外, 由于系统闭环传递函数  $G_{Loop}(z)$  可写为式 (4)。

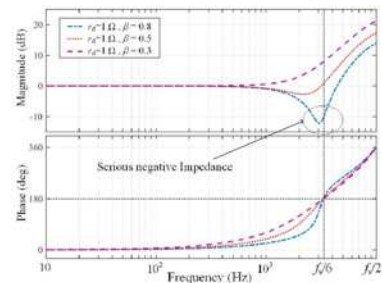


图 4 传统控制条件下电流内环耦合阻抗特征分析

$$G_{Loop}(z) = \frac{\alpha \cdot \beta}{z^3 - 2z^2 + (1 + \beta) \cdot z + (\alpha \cdot \beta - \beta)} \quad (4)$$

式 (4) 中,  $\alpha = (k_{pi}T_s)/C_{dc}$ 。则结合式 (4) 与朱利判据可知, 若要使系统稳定则必须使  $\alpha + \beta < 1$ , 即内外环控制增益  $k_{pi}$  与  $k_{pv}$  存在互相限

制关系:

$$k_{pi} < \left(1 - k_{pv} \cdot \frac{T_s}{C_{dc}}\right) \cdot \frac{L}{T_s} \quad (5)$$

在上述约束条件下,结合公式(3)可以获得  $z_c$  的频域特征。随着  $\beta$  值的增加,  $z_c$  的幅值在一定频段内降低,这在一定程度上有利于系统的抗扰特性。但  $\beta$  值靠近临界值时,  $z_c$  的负阻抗特征会使  $z_c$  的幅值增加,会使其在系统极点频域附近偏离容性特征,从而降低系统高频抗扰能力。

### 2 负载电流前馈下系统阻抗模型分析

为提升系统的抗扰性能,常将扰动电流前馈控制引入系统,将  $i_d$  通过前馈通道传递函数  $G_f$  前馈至电流内环给定,从而抵消扰动电流对系统的影响。这种结构在物理上可等效为将  $i_d$  通过  $G_f$  前馈至内环给定以及将  $i_d$  通过  $G_f$  反馈至内环给定两部分,前馈环节的传递函数  $G_{inf}$  可描述为:

$$G_{inf} = \frac{G_{in}}{1 - G_f \cdot G_{in}} \quad (6)$$

令:  $z_{it} = G_{vc}^{-1} \cdot G_{inf}^{-1}$ ,  $z_{it} = G_{inf}^{-1} \cdot G_f^{-1} \cdot z_{c,dc}$ 。可获得扰动电流前馈控制下的支路系统等效电路结构,对比图3可知,负载电流前馈即改变了  $z_{it}$ ,也在母线电容两端等效并联了阻抗  $z_{of}$ ,其特征与  $C_{dc}$  直接相关。可见,在扰动电流前馈控制条件下,系统输出阻抗  $z_{of}$  由  $z_{c,dc}$  与  $z_i$  并联而成,其中  $z_i$  依赖于控制器特征,  $z_{of}$  可描述为:

$$z_{of} = z_f \parallel z_{c,dc} = \frac{z_f \cdot z_{c,dc}}{z_f + z_{c,dc}} = (1 - G_f G_{in}) z_o \quad (7)$$

输出阻抗  $z_o$  频率特征如图5。在前馈作用下系统整体输出阻抗在很宽的频带内都有较大改善,且适当提升内环增益会拓展前馈控制的作用带宽,然而这却会加剧高频段  $z_i$  的负阻抗特征,进而使  $z_{of}$  的幅值在高频段显著高于  $z_c$  甚至使系统失去高频阻尼特征。

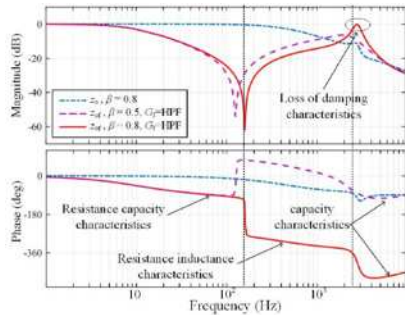


图5 扰动电流前馈下支路系统输出阻抗特征分析

### 3 系统高频段输出阻抗特征优化方法

由于前述前馈控制经由电流内环通道,本文拟对电流内环控制器进行优化,以期在改进电流内环特征的基础上提升扰动电流前馈控制在高频段的响应特性。在电流内环原有控制器基础上增加相位补偿环节  $G_{cmp}(z)$ 。补偿环节的参数选取原则为:既要拓宽电流内环的控制带宽范围,又要增强电压外环的稳定裕度。 $G_{cmp}(z)$ 可由式(8)进行描述:

$$G_{cmp}(z) = \frac{2}{(1+z^{-1})[(1-\delta)-\delta z^{-1}]} \quad (8)$$

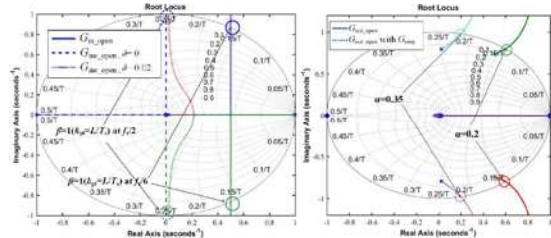
内环开环传递函数  $G_{inc\_open}(z)$ 可描述为:

$$G_{inc\_open}(z) = G_{ic}(z) \cdot G_{cmp}(z) \cdot \frac{T_s}{L} \frac{1}{z(z-1)} \quad (9)$$

$G_{cmp}(z)$ 对电流内环的补偿效果如图6(a)所示。可见,未采用  $G_{cmp}(z)$ 时,内环开环传递函数  $G_{inc\_open}(z)$ 的根轨迹在  $\beta=1$  时与单位圆相交于  $f/6$  处。引入  $G_{cmp}(z)$ 后,若  $\delta=0$  则  $G_{inc\_open}(z)$ 的根轨迹在  $\beta=1$  时与单位圆相交于  $f/2$  处,可见内环的带宽获得了拓展。但在小增益下系统有靠近-1点的开环极点,故令  $\delta=0.02$ ,从而在正实轴引入一个较小的极点以减小负实轴极点的影响。此时,  $G_{inc\_open}(z)$ 的根轨迹如图中虚线所示,在低增

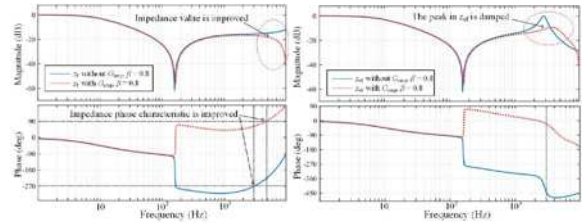
益附近偏离虚轴,但不影响高增益下的系统特征。将采用  $G_{cmp}(z)$ 的电流内环闭环传递函数  $G_{inc}(z)$ 作用于系统则外环的开环传递函数可以写为:

$$G_{out\_open}(z) = G_{vc}(z) \cdot G_{inc}(z) \cdot \frac{T_s}{C_{dc}} \frac{z}{z-1} \quad (10)$$



(a) 电流内环根轨迹对比图 (b) 电压外环根轨迹对比图 ( $\beta=0.8$ )  
图6 含有补偿环节的前向通道根轨迹分析图

$G_{cmp}(z)$ 对电压环的作用效果如图6(b)所示。可见外环的作用带宽获得了拓展。另外,由于  $\alpha$  的临界取值范围由  $0.2(1-\beta)$  增加到  $0.35$ ,所以  $\alpha$  不再受到公式(5)的取值限制,外环控制器增益范围获得了提升,即在相同增益条件下系统稳定裕度获得了改善。



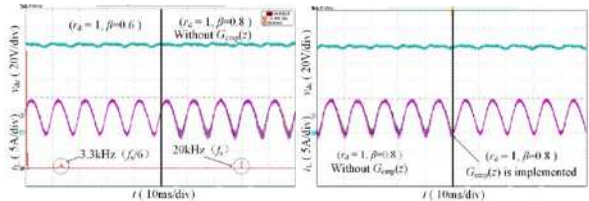
(a)  $z_i$ 的频域特征分析 ( $\alpha=0.128, T_s=50\mu s$ ) (b)  $z_{of}$ 的频域特征分析 ( $\alpha=0.128, T_s=50\mu s$ )

### 图7 含有补偿环节的系统输出阻抗频域特性分析

$G_{cmp}(z)$ 对前馈系统等效输出阻抗  $z_o$ 的改善效果如图7(a)所示,可见,在高频段  $z_o$ 的阻感特征所占的频域范围得以拓宽,等效阻抗幅值也得以明显衰减。这就使得系统整体等效输出阻抗  $z_{of}$ 由于高内环增益产生的峰值得以衰减,如图7(b)所示,从而系统整体等效输出阻抗得以优化。同时优化扰动电流前馈控制在高频段的等效输出阻抗特征且便于在数字控制系统中实施。

### 4 实验分析与验证

为了验证本文采用的相位补偿方法以及其对系统的等效输出阻抗优化效果,搭建了应用于直流微电网的储能支路实验平台。未采用扰动电流前馈时,扰动源以  $100\text{Hz}$  扰动电流对公共直流母线进行扰动,由于此时系统输出阻抗在  $100\text{Hz}$  处幅值较高,  $v_{dc}$  的波动幅值虽然有所减小,但没有获得有效的抑制。引入扰动电流前馈控制后,由于系统等效输出阻抗大幅度下降,所以系统抗扰能力获得显著改善,母线电压波动得以抑制。为抑制更高频段的电压波动将电流内环控制增益提高(由  $\beta=0.6$  调整为  $\beta=0.8$ ),则  $v_{dc}$  与  $i_d$  的波形如图8(a)所示,由于等效输出阻抗在高频段 ( $f/6$ ) 处存在峰值系统稳定裕度较小,所以出现该频率处的电流震荡并耦合到直流母线。此时引入补偿环节  $G_{cmp}(z)$ ,由图8(b)可知这种高频震荡得到有效抑制。



(a) 内环控制增益提升至  $\beta=0.8$  系统输出波形 (b)  $\beta=0.8$  时引入  $G_{cmp}(z)$ 前后系统输出波形

图8  $100\text{Hz}$  扰动下系统补偿环节前后的输出电压与电流波形图

(下转第94页)

(上接第 58 页)

## 5 结论

在考虑了数字控制延迟、开关等效延迟等基础上,重新构建了储能支路的等效阻抗模型。通过在电流内环中引入了相位补偿环节,从而使系统在以下三个方面的性能有所改善:电流内环的作用频带得到拓展;电压外环的稳定裕度得到改善;在扰动电流前馈控制下,系统等效输出阻抗在高频段的特征得到优化。文章通过理论分析与实验验证了这种方法的正确性与可行性,证实其能够在较宽频带范围内抑制直流微电网中公共直流母线电压的波动。

## 参考文献:

[1]李霞林,郭力,王成山,等.直流微电网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(1):2-16.  
[2]郭伟,赵洪山.基于事件触发机制的直流微电网多混合储能系统分层协调控制方法[J].电工技术学报,2020,35(5):12.

[3]滕昌鹏,王玉斌,周博恺,等.含恒功率负载的直流微网大信号稳定性分析[J].电工技术学报,2019,34(5):10.

[4]毕大强,范柱烽,解东光,等.海岛光储直流微电网自治控制策略[J].电网技术,2015,39(4):6.

[5]Aguiar C, Fuzato G, Machado R, et al. An Adaptive Power Sharing Control for Management of DC Microgrids Powered by Fuel Cell and Storage System[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2019, PP(99):1-1.

[6]吕振宇,吴在军,窦晓波,等.基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J].中国电机工程学报,2015,35(017):4397-4407.

[7]陆晓楠,孙凯,Josep Guerrero,等.适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J].电工技术学报,2013,28(4):8.