

分布式交直流混联系统及自适应动态下垂技术研究

王 林^{1,2}, 董 雪³, 张俊伟^{1,2}, 成月良³, 张泽成^{1,2}, 张 波^{1,2}

(1. 国华(乳山)新能源有限公司, 山东 威海 264500;

2. 山东国华时代投资发展有限公司, 山东 济南 250002;

3. 国电南瑞南京控制系统有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 分布式交直流混联系统采用配电多区柔性组网技术及消纳提升策略, 为分布式新能并网接入与潮流优化调度提供了高效可行手段。针对源荷功率消纳需求, 首先提出分布式交直流系统架构及其能量管控运行模式, 然后通过分析分布式交直流系统的等效数学模型及工频与高频环流的产生机理, 提出考虑功率均衡控制和高频环流抑制的自适应动态下垂控制技术。最后, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建了分布式交直流系统的仿真模型并进行算例验证, 仿真结果表明所提技术可在保持系统稳定性基础上实现源荷消纳提升和潮流优化调控。

关键词: 分布式交直流; 柔性组网; 自适应动态下垂; 高频环流

中图分类号: TM863

文章编号: 1000-0682(2024)02-0136-07

文献标识码: A

DOI: 10.19950/j.cnki.CN61-1121/TH.2024.02.024

Research on distributed AC DC hybrid system and adaptive dynamic sag technology

WANG Lin^{1,2}, DONG Xue³, ZHANG Junwei^{1,2}, CHENG Yueliang³, ZHANG Zecheng^{1,2}, ZHANG Bo^{1,2}

(1. China Guohua (Rushan) New Energy Co., Ltd., Shandong Weihai 264500, China;

2. Shandong Guohua Times Investment Development Co., Ltd., Shandong Jinan 250002, China;

3. NARI Technology Nanjing Control System Co., Ltd., Jiangsu Nanjing 211100, China)

Abstract: Distributed AC/DC hybrid system adopts multi-zone flexible networking technology and consumption improvement strategy, providing efficient and feasible means for distributed new energy grid-connected and power flow optimization. For satisficing the demand for source & load's power consumption, firstly a distributed AC/DC system architecture and its energy operation mode were proposed. Then, by analyzing the equivalent mathematical model of the distributed AC/DC system and the generation mechanism of power-frequency and high-frequency circulating currents, an adaptive dynamic droop control strategy considering power balance control and high-frequency circulating current suppression was proposed. Finally, a simulation model of distributed AC/DC system was built in PSCAD/EMTDC and verified through numerical examples. Simulation results showed that the proposed technology can achieve improved source load absorption and optimized power flow regulation while maintaining system stability.

Keywords: distributed AC/DC system; flexible networking; adaptive dynamic droop; high-frequency circulation.

0 引言

随着全球能源需求的不断增长和环境问题日益

严重,对电力系统的可靠性、效率和可持续性提出了更高的要求。传统电力系统面临着诸多挑战:输电损耗大、供电可靠性低、对可再生能源的利用限制等。为了应对这些挑战,分布式电力系统被广泛研究并逐渐应用。分布式交直流配电网^[1]是一种柔性配电组网技术,采用能量优化管理技术后,对分布

收稿日期:2023-12-29

第一作者:王林(1984—),男,山东威海人,硕士研究生,高级职称,研究方向为电力系统。

式可再生能源消纳提升会起到积极作用。分布式交直流混联系统作为一种新兴的电力系统架构,在现代电力系统领域受到了越来越多的关注。与传统的交流或直流系统相比,分布式交直流混联系统具有更高的灵活性、更好的能量转换效率以及更强的容错能力。它能够将不同类型的可再生能源(如太阳能、风能等)与负载有效地连接起来,并通过适当的能量管理策略实现高效能源转移和优化。

目前,国内外研究机构和高校对分布式交直流配电网的研究逐渐增多,但现有文献大部分研究侧重于直流源荷功率控制^[2-6],针对可再生能源消纳提升的研究较少,针对多区不同分量环流的分析及抑制更为稀少。文献[7]提出多端交直流配电网的潮流分层控制策略,分析了有功功率-直流电压下垂控制的控制算法,但没有提出实现自适应潮流优化调控,也没有提出多端互联后对不同频次环流分量的抑制。文献[8]提出利用多端口电力电子变压器构建交直流混合系统,减少变换环节,提高能源利用效率,增强系统控制能力,但没有针对系统交流子网与直流子网的相互影响进行研究。文献[9]针对含大规模风电机组接入的交直流混联输电系统,提出通过强化送端系统动态无功支撑能力,进而提高混联电网外送消纳能力,但未对分布式光伏机组接入的交直流混联输电系统进行分析。文献[10]-[12]针对大容量直流和高比例新能源集中接入的交直流送端系统安全稳定运行的问题,提出综合能源交直流混联外送系统暂态过电压分析与快速

估算方法。文献[13]-[19]提出了交直流配电网的规划方法,但是所有的规划都仅仅停留在传统交流配电网的层面上,并未考虑分布式交直流配电网的架构及调控模式。

该文首先提出了分布式交直流系统架构及等效数学模型,设计了自适应动态下垂控制算法及区内外源荷潮流优化调控策略,搭建了750 V的4端分布式交直流配网仿真模型,并对该文所提控制策略进行算例分析及仿真验证。

1 分布式交直流系统架构及调控模式

分布式交直流混联系统以现有交流配电网为基础,配电台区的交流母联间隔分别装设AC/DC变流器,相邻区域内的台区变流器通过共直流母线方式连接,形成多个台区互联的区域交直流配电网;区域交直流配电网之间通过直流线路进行环网互联,构成跨区混联交直流配网系统。其中,分布式光储、交直流负荷分别就近通过附近台区并网,典型两区交直流系统架构如图1所示。

一方面,区内系统通过交流共母线或直流公母线的方式接纳所辖内分布式源荷,区内各AC/DC变流器仅需要按照台区动态容载比调配潮流,易于提高就地消纳和新能源利用率;另一方面区间配网系统通过直流环网线路进行潮流互济,将单个区内无法均衡的潮流进行交互,进一步提高消纳率,同时提升配电等级全网的潮流调配能力,避免在新能源大发时期出现局部重载甚至逆功率的问题。

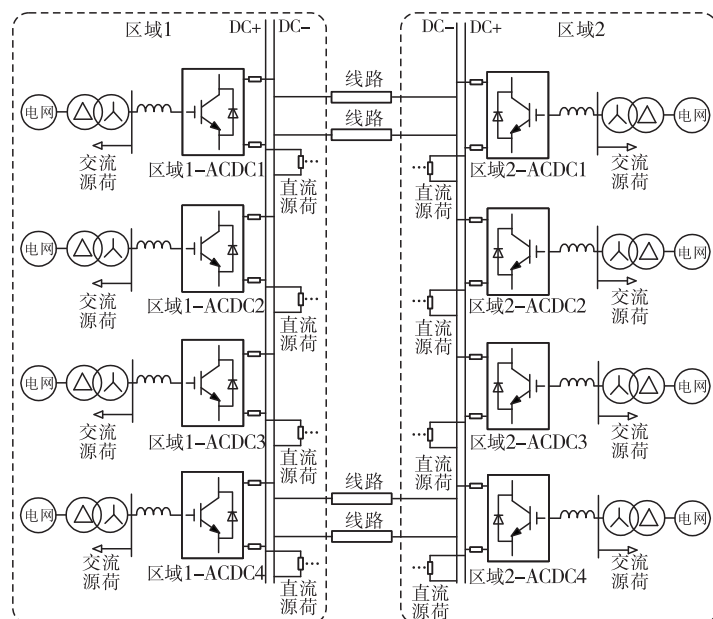


图1 分布式交直流混联系统典型架构图

分布式交直流混联系统根据各台区及各区域的源荷就地消纳情况进行自适应的能量管理,主要目标为将源荷消纳剩余功率通过潮流调控进行消解。区间调配功率根据监测各区域的源荷消纳功率状况(源荷功率分为交流源荷功率叠加直流源荷功率),再基于各台区源荷消纳容量比例(图 1 中 K_{alloc})进行二次分配,若仍有消纳缺口,则利用分布式储能进行集中调配。

具体策略为,接于各区直流母线上直流源荷可自动实现就地消纳,而不需要进行功率的调配。区间源荷功率的消纳需依托区间互联环网进行消纳,还需对各区就地消纳后可能存在的消纳余值(即逆功率部分)进行优化分配,区内源荷功率在以台区为单位进行就地消纳基础上同时将各并网数据送至 EMS 能量管理模块,若区域内总的并网逆向功率部分绝对值小于并网正向功率部分绝对值,则采用跨区域消纳策略,即各逆向功率区域的 ACDC 变流器有功指令为区内源荷消纳余值,各正向功率台区的 ACDC 变流器有功指令为总源荷消纳按照各区配变容量进行比例分配,此为基础调配部分;若区域内总的逆向功率部分绝对值超过正向功率部分绝对值,利用集中控制系统动态判断分布式储能的消纳裕量,将剩余消纳部分之和按照分布式储能的容量和 SOC 进行配比计算储能消纳功率指令。

$$P_{\text{ACDC}} = \sum_{i=1}^m P_{\text{ac}-i}^{\text{neg}} * \frac{S_{T-i}}{\sum_{i=1}^m S_{T-i}} \quad (1)$$

$$P_{\text{storage}} = \sum_{i=1}^k P_{\text{ac}-i}^{\text{pos}} - \sum_{i=1}^m P_{\text{ac}-i}^{\text{neg}} * \frac{\text{SOC}}{\sum_{i=1}^M \text{SOC}_i} \quad (2)$$

其中: S_{T-i} 为台区配电变额定容量; $P_{\text{ac}-i}^{\text{pos}}$ 为本区域配电网内源荷逆功率部分; $P_{\text{ac}-i}^{\text{neg}}$ 为本区域配电网内源荷正功率部分; P_{storage} 为储能变流器有功控制指令; P_{ACDC} 为交直变流器有功控制指令。

采样这种自适应功率调控模式的多端直流配电网,虽然不需要单独实时监测整个系统的负荷或电源出力,只需要对交流源荷功率进行不同情况的调配,但仍需对分布式交直流系统的电压稳定进行功率均衡控制。一方面,各变流器采用自适应动态下垂控制,在联络线分布参数差异较大时下垂系数叠加补偿虚拟阻抗分量(K_{droop} ,详见该文第 3 节);另一方面,在选择中位数阻抗参数的台区变流器作为

基准变流器,通过慢时间尺度母线直流电压闭环控制实现系统功率均衡的调节,从而在动态调节各 ACDC 变流器功率指令时保持系统直流电压暂态稳定,避免多机互联后频域稳定性出现异常,如图 2 所示。同时,区间调配功率根据监测各区域的源荷总功率(源荷总功率为交流源荷功率叠加直流源荷功率),再基于各台区源荷消纳容量比例(图中 K_{alloc})进行二次分配。

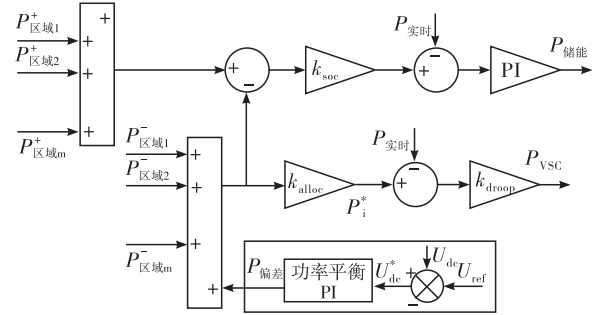


图 2 区间功率优化调配及补偿机制

在接地方式方面,由于分布式交直流混联系统直流互联,且单个配电区域内台区交流侧为接地方式,因此存在经由直流正负线路和交流回路流转的高频环流。另外,由于各 ACDC 变流器与公共直流母线及不同区域间直流线路阻抗不同,造成不同变流器间同时存在稳态环流分量。因此,除需考虑多区间的潮流优化控制,还需按对上述两种分量的环流分量进行抑制,考虑实现方式的简便性和经济性。

2 分布式交直流混联系统等效模型及环流分析

当多个分布式接入的 ACDC 变流器以交直流并联方式形成多端混联系统后,即便每个 ACDC 变流器中无零序回路(采用单侧接地方式),某混联 VSC 的交流测和其他混联 ACDC 变流器的交流测仍然通过直流正负回路形成环流回路,而若均采用配电变的 Dyg 低压侧接地方式,则系统的高频环流回路则还会增加分量,等效模型如图 2 所示。一方面,与单 ACDC 变流器通过直流电容正侧线路和直流电容负侧线路行程零序回路不同的是,多端并联 ACDC 构成的系统通过直流正极线路和直流负极线路分别与并联 VSC 的直流正极线路和直流负极线路形成了高频环流回路;另一方面,各端并联的分布阻抗值不同,造成端间压差在不同端所在回路的环流大小存在一定差异。

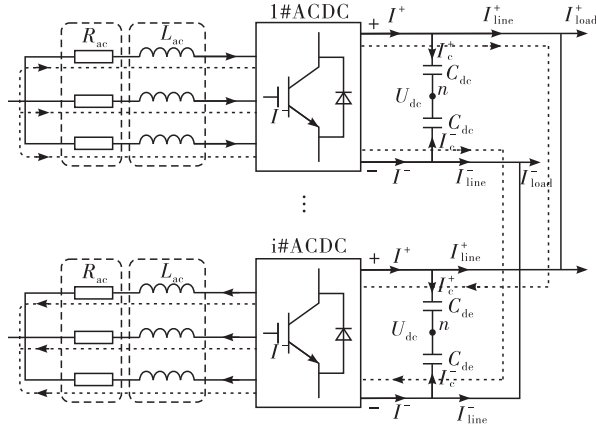


图3 分布式交直流系统环流回路

典型两 VSC 并联的单相环流等效电路如图 3 所示,在直流电压稳定下 VSC 交流对正极及负极电压采用调制度模型进行分析, α_{PWM} 为并联 VSC 工况不一致引入的幅差。同时由于三相零序电压差并不相同,因此三相分别产生的环流电流分量不相同。并联系统的环流分量主要体现为 I_{line}^+ 及 I_{line}^- , 由于并未通过直流正负线路行程回路,因而 $I_{\text{line}}^+ \neq I_{\text{line}}^-$, 此时,交流侧环流分量变换至直流侧其频次会按照正序负序的不同而发生一定的增减变化。若交流侧接地,则环流数学模型还会增加载波频次的环流分量。

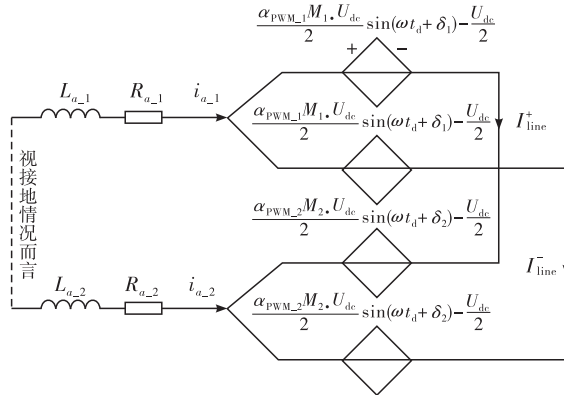


图4 分布式交直流系统单相环流数学模型

A 相为例,ACDC 变流器正极电压的 FFT 分解式为^[9-10]:

$$U_{ca}^+ = \frac{U_{dc}}{2} M \sin(\omega_0 t - \varphi) + \frac{2U_{dc}}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\infty}^{\infty} \frac{1}{m} J_n \cdot \left(m \frac{\pi}{2} M \right) \sin \left[(m+n) \frac{\pi}{2} \right] \cos(m\omega_c t + n\omega_0 t) - \frac{U_{dc}}{2} \quad (3)$$

式中: ω_0 为电网角频率; ω_c 为载波角频率; M 为调制度; U_{dc} 为直流电压; $J_n(x)$ 为 n 阶第一类 Bessel 函数; m 为相对载波的谐波次数; n 为相对基波的谐波次数。

从 ACDC 变流器正极电压的傅氏分解式中可看出,主要包含分量为: $\omega_c, 3\omega_c$ 等开关频率次零序谐波; $m\omega_c \pm n\omega_0$ 的边带谐波。考虑到当 $m > 3$ 或者 $n > 5$ 时谐波可以忽略不计,主要为:开关频率次谐波为 $\omega_c, 3\omega_c$, 边带谐波为 $\omega_c \pm 2\omega_0, 2\omega_c \pm \omega_0, 2\omega_c \pm 3\omega_0, 2\omega_c \pm 5\omega_0$, 主要谐波的零序分量为 $\omega_c, 3\omega_c, 2\omega_c \pm 3\omega_0$ 。同时,由于占比最大的分量为 $m=1$ 的零序分量,当 m 增大时,零序分量显著减少。因此,单相电压中零序分量主要为:公式(3)第 2 部分取 $m=1, m=3$, 公式(3)的第 3 部分取 $m=2, n=\pm 3$, A 相如公式(4)所示:

$$u_{a0} = \frac{2U_{dc}}{\pi} J_0 \left(\frac{\pi}{2} M \right) \cos(\omega_c t) + \frac{2U_{dc}}{\pi} J_0 \left(\frac{3\pi}{2} M \right) \cos(3\omega_c t) - \frac{2U_{dc}}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} M \right) \cos(2\omega_c t + 3\omega_0 t) - \frac{U_{dc}}{2} \quad (4)$$

B 相、C 相零序电压计算式分别 a 相零序电压计算式移相 $+2\pi/3$ 及 $-2\pi/3$ 。

在不同 PWM 调制方式下,VSC 交流出口电压的频域分布及含量有所不同。由图 4 正极环流等效电路,取 ω_c 为典型频次,并联 VSC 的正极 A 相环流电压为:

$$u_{a\text{-parallel}}^+ = \frac{2\alpha_{\text{PWM}1} U_{dc}}{\pi} J_0 \left(\frac{\pi}{2} M_1 \right) \cos(\omega_c t + \delta_1) - \frac{2\alpha_{\text{PWM}1} U_{dc}}{\pi} J_0 \left(\frac{\pi}{2} M_2 \right) \cos(\omega_c t + \delta_2) \quad (5)$$

若多个变流器的交流侧并联且直流侧并联,即便采用所提的单侧接地方式,直观上看多端并联系统中不存在零序回路。但是,并联 ACDC 系统利用并接的直流回路形成零序通路,并联 ACDC 系统中也就产生了零序回路,因而在零序电压的作用下产生了零序环流。

3 自适应动态下垂控制技术

与传统发电机不同,交直流并联系统的有功类下垂控制以有功功率和直流电压的下垂耦合特性为主,对应于常规交流侧 P/f 下垂控制特性,表现为直流侧 P/U 下垂特性,下垂特性参数主要与直流线路分布参数有关。图 5 为模块级的下垂控制原理框图。

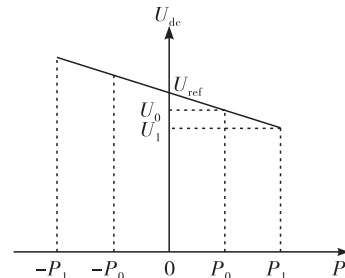


图5 分布式交直流系统单相环流数学模型

下垂控制曲线方程如下:

$$U = U_{\text{ref}} - rI_o = U_{\text{ref}} - k \cdot P \quad (6)$$

下垂控制相比定功率控制会使得并联多机的控制特性进行自动的调节,从而保障多机间功率的协同一致。初始,变流器工作点,电压 U_0 ,功率 P_0 ;负荷增加至 P_1 ,输出电流 I_o 增大,通过下垂控制,设置电压参考值减小,给定电压沿曲线向下移动,直到模块功率和负荷功率平衡,达到工作点 U_1 。下垂曲线方程中含 U_{ref} 和斜率 k 两个参数,通过改变这两个参数,可调节变流器输出功率。

一方面,由于各 ACDC 变流器至互联直流公共点的线路阻抗存在实际参数差异,因此在对各 ACDC 变流器进行功率调配时,各 ACDC 的下垂特性(曲线)有所差异,因此各 ACDC 的协同程度存在偏差,在各 ACDC 接受相同功率指令(即均流目标)时就会存在环流,若各 ACDC 变流器接受到的功率指令由于 EMS 调配造成不同,则直流电压偏差更为严重,稳态功率环流会加剧。

为解决互联系统端间分布参数(直流侧)不一致所造成的稳态功率环流问题,通过自适应动态下垂控制调节多机间的功率均衡特性,使不同 ACDC 间在下垂控制时叠加额外虚拟阻抗分量,使各端变流器的出力符合一个阻抗功率特性,即满足同一下垂曲线,保证了各 ACDC 变流器的协同一致和功率调节均衡,如图 6 所示。各 ACDC 变流器下垂控制斜率系数 k 的设定,以各接入线路的分布阻抗为基础,通过选取参数居中的分布参数及下垂系数的补偿,在变流器直流侧与公共直流母线之间引入了一个等效虚拟电阻 $R_{\text{vir}1}$,ACDC 基准下垂电压即其空载电压 U_{ref} 的设定,应考虑变流器电压的限值运行范围。在各线路初始分布参数的动态识别方面,可以利用直流电压变动时的两次功率潮流计算公式,对直流回路的阻抗进行计算求解,以某端 ACDC 为例,设定其他 ACDC 不变动,只调节该 ACDC 的潮流控制指令,通过线路电压、功角的联合公式求解,即可得出该回路的分布阻抗参数。

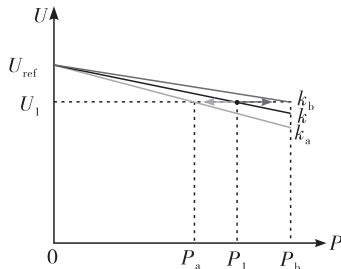


图 6 基于虚拟阻抗补偿工频环流抑制的下垂控制原理图

另一方面,交直流系统的区间存在由于 PWM 调制所产生的多 ACDC 间的高频环流分量,对系统运行稳定性存在影响。为抑制该分量,需要进行高频环流虚拟阻抗抑制控制,具体为通过对三相电流进行 FFT 采样分析,得出高频环流的频次及幅值,按照交流测串联 LCL 虚拟阻抗的幅频特性曲线构建高频环流抑制的虚拟阻抗,即为图 7 中的并联单调串联谐振滤波器,得出串联阻抗的频域传递函数,再与所分离的高频环流部分进行数字离散化相乘,得出高频环流抑制的反向电压分量,通过 PWM 电压调制,减去了产生高频环流分量的电压分量,从而抑制了高频环流的电流分量。

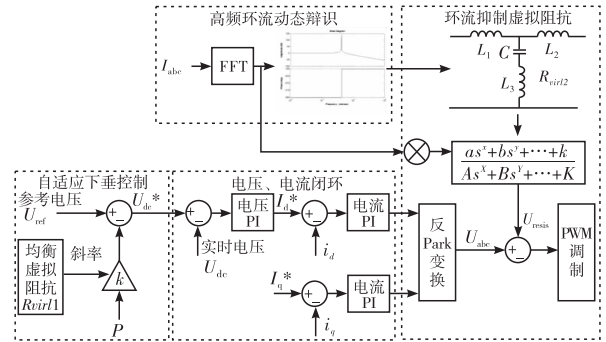


图 7 分布式交直流系统环流控制架构图

4 仿真算例

以 4 区分布式交直流配网为例,搭建 PSCAD/EMTD 仿真模型,如图 8 所示。

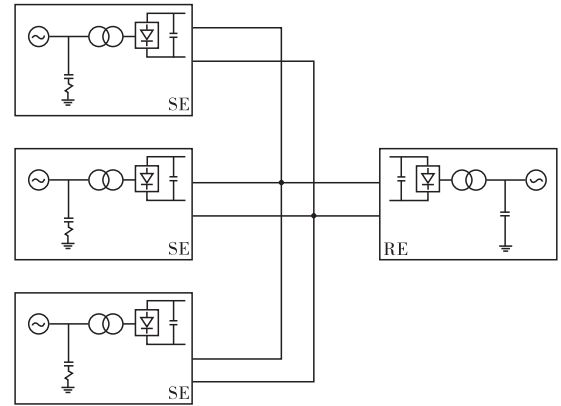


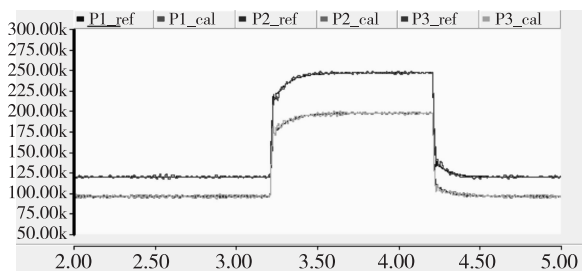
图 8 分布式交直流系统仿真模型

3 个台区构成 1 个分布式配网,1 个电气距离大的台区构成另一个分布式配网,2 个分布式配网通过直流连接构成分布式交直流系统,单个 ACDC 变流器容量为 500 kVA,通过所在配网的台区配电变压器接入,台区交直流与直流侧接入一定容量的分布式光伏及储能。其中,交流/直流电压为 380 V/750 V,直流线路阻抗分别为 0.3、0.2、0.25、0.4,

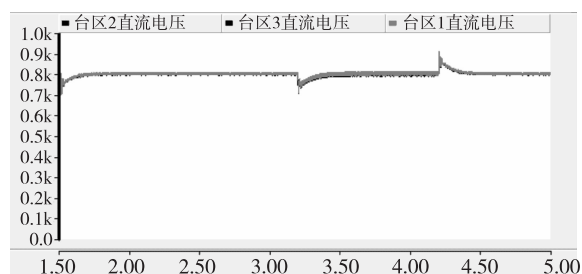
EMS 功率分配采用区内消纳叠加区间互济功率进行管控,控制策略采用针对区间工频环流和高频环流抑制的自适应动态下垂控制,下垂基准参数为 $2.5e-4$ 。

4.1 区间源荷消纳下功率调配及自适应下垂控制

ACDC 变流器 1~4 首先通过不控整流进行直流升压,1.5 s 时各变流器启动动态下垂控制并达到直流电压设定值,此时 EMS 对区内源荷消纳进行管控,3.2 s 时,配电区域 1~3 由于新能源出力增大出现并网处逆功率,而配电区域 4 存在可用负荷,因此能量管理系统通过调控各 ACDC 功率指令,ACDC-1 输出功率从 125 kW 增加到 250 kW,ACDC-2 和 ACDC-3 均从 100 kW 增加到 195 kW,动态下垂比例系统为 5:3.9:3.9,实现了不同线路阻抗下的区域 2 和区域 3 工频功率相同,避免了工频环流,系统直流电压维持稳定;在 5 s 时,各区域消纳功率回归原值,ACDC1-3 变流器输出功率相应减小,ACDC4 输出功率增加。各 ACDC 调节功率按优化源荷消纳容量系数分配需消纳功率,实现各台区按可用容量限值比例负荷互供,当出现逆功率时进行区内外潮流调控,进一步提高分布式新能源消纳率,同时兼顾了各区域变压器的负载率优化利用。



(a) ACDC-1~ACDC3 的有功功率



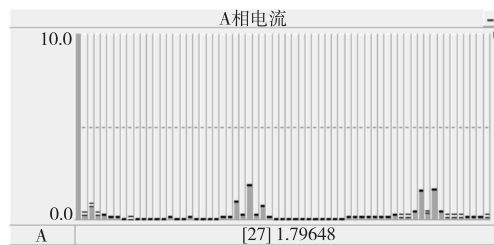
(b) ACDC-1~ACDC3 的瞬时直流电压

图9 分布式交直流系统区间源荷消纳仿真波形图

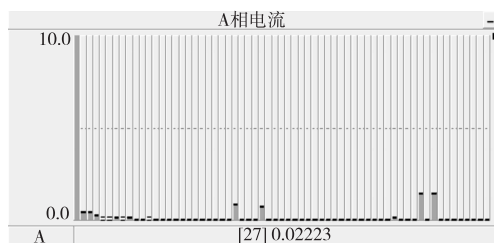
4.2 高频环流抑制下垂控制

针对各 ACDC 变流器互联后交直回路间存在的高频环流抑制问题,通过 FFT 对分量进行提取,并设置环流抑制虚拟阻抗频次为 27 th (1350 Hz),启动变流器的高频虚拟阻抗下垂控制,在调制环叠加

该频次抑制电压分量,从而抵消了 ACDC 变流器阀侧电压的高频电压分量,抵消了该部分的环流分量,如图 10 所示。



(a) 未进行高频环流抑制的交流电流频谱



(b) 进行高频环流虚拟阻抗抑制后的交流电流频谱

图10 高频环流分量抑制仿真图

5 结论

该文设计了分布式交直流系统架构,分析了其等效数学模型及环流分量,提出自适应动态下垂控制算法及区内外源荷潮流优化调控策略,提升了高比例新能源的消纳度,实现了系统暂态电压稳定及功率均衡,同时抑制了工频环流和高频控制环流分量。在 PSCAD 中基于该文算法搭建 4 端仿真模型并进行仿真验算。仿真结果表明:分布式交直流系统在可实现源荷消纳功率优化及暂态电压稳定,环流分量得到抑制,避免了系统损耗并提高了运行安全性,验证了该文所提控制策略的可靠运行。

参考文献:

- [1] 张勇军,羿应棋,李立涅. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1-12.
- [2] 丁明,田龙刚,潘浩,等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
- [3] 朱永兴. 虚拟负阻抗在微网下垂控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(3): 66-71.
- [4] 徐德鸿. 电力电子系统建模及控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2010.
- [5] GUERRERO J M, GARCIAD E Vicuna L, MATAS J, et al. Output impedance design of parallel-connected ups inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on industrial electronics, 2005, 52(4): 1126-

- 1135.
- [6] 陈丽娟,王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,V44(4):16-21.
- [7] 彭克,咸日常,张新慧. 多端互联交直流配电网的潮流分层控制策略及算法[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):72-77.
- [8] 吴争,孔力,袁晓冬,等. 基于电力电子变压器的交直流混合可再生能源关键技术[J]. 电工电能新技术,2019,38(02):1-10.
- [9] 郝晓弘,胡开伟,裴婷婷,等. 风电接入交直流混联电网外送消纳能力研究[J]. 太阳能学报,2021,42(10):195-201.
- [10] 衣立东,摆世彬,张文朝,等. 综合能源交直流混联外送系统暂态过电压分析与快速估算[J]. 太阳能学报,2023,44(06):122-129.
- [11] 丁明,潘浩,张晶晶. 分布式电源接入交直流混合微电网群优化规划研究[J]. 太阳能学报,2021,42(06):54-62.
- [12] 周建萍,薛亚林,徐征. 基于功率交互和充放速率优化的交直流混合微网控制策略研究[J]. 太阳能学报,2018,39(12):3558-3567.
- [13] 麻秀范,崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报,2011,26(3):175-181.
- [14] 戴上,张焰,祝达康. 含有微电网的配电网规划方法[J]. 电力系统自动化,2010(22):41-45.
- [15] 盛四清,范林涛,李兴,等. 基于帕累托最优的配电网多目标规划[J]. 电力系统自动化,2014,38(15):51-57.
- [16] 肖峻,张婷,张跃,等. 基于最大供电能力的配电网规划理念与方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):106-113.
- [17] 李高望,陈锐智,陈艳波. 考虑网络划分优化的交直流系统并行电磁暂态仿真研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(04):72-80.
- [18] 陈汉雄,李婷,李奥. 提升电网运行的交直流系统协调控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(10):123-134.
- [19] 李兴,杨智斌,颜远,等. 考虑换流站损耗特性的交直流系统多目标无功优化控制[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(09):119-125.

(上接第 123 页)

- [11] JAMIL M, YANG X S. A literature survey of benchmark functions for global optimization problems[J]. International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation, 2013, 4(2): 150-194.
- [12] 李中,路宇,王鑫,等. 基于 ABC-LSTM 的变压器表面振动基频幅值预测[J]. 工业控制计算机,2021,34(06):21-23+26.
- [13] 马宏忠,赵宏飞,陈楷,等. 基于振动的变压器铁心松动判定方法[J]. 电力系统自动化,2013,37(14):101-106.
- [14] 韩中合,焦宏超,徐搏超,等. 基于 EEMD 样本熵和 SVM 的振动故障诊断研究[J]. 汽轮机技术,2015,57(06):457-460.
- [15] 徐搏超. 基于 HVD 和相关向量机的转子多故障分类优化[D]. 保定:华北电力大学,2017.
- [16] 李浩瀚. 燃气轮机控制系统执行器的复合故障诊断研究[D]. 北京:华北电力大学(北京),2022.

(上接第 129 页)

- [8] CHEN S, GUO L, FAN J, et al. Bandwidth-aware adaptive chirp mode decomposition for railway bearing fault diagnosis[J]. Structural Health Monitoring, 2024; 23(2):876-902.
- [9] ALMONACID B, SOTO R. Andean condor algorithm for cell formation problems[J]. Natural Computing, 2019, 18: 351-381.
- [10] CICONI A, LIU J, ZHOU H. Adaptive local iterative filtering for signal decomposition and instantaneous frequency analysis[J]. Applied and Computational Harmonic Analysis, 2016, 41(2): 384-411.
- [11] LIU Y, YUAN D, GONG Z, et al. Adaptive spectral trend based optimized EWT for monitoring the parameters of multiple power quality disturbances[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 146: 108797.
- [12] 李华,伍星,刘韬,等. 基于信息熵优化变分模态分解的滚动轴承故障特征提取[J]. 振动与冲击,2018,37(23):219-225.
- [13] JACEK D. Diagnosing of rolling element bearings using amplitude level based decomposition of machine vibration signal[J]. Measurement, 2018, 126: 413-153.
- [14] LI C, LIU Y, LIAO Y, et al. A VME method based on the convergent tendency of VMD and its application in multifault diagnosis of rolling bearings[J]. Measurement, 2022, 198: 111360.
- [15] 王建国,刘冀韬,张文兴. 自适应 MCKD 和 VMD 在行星齿轮箱早期故障诊断中的应用[J]. 机械设计与制造,2022(6):130-133.