

多端柔性直流输电系统动态附加频率控制策略

刘昊宇,刘崇茹,蒋思雯

(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:附加频率控制利用基于电压源型换流器的多端柔性直流输电(VSC-MTDC)系统直流电压变化传递故障交流系统频率变动,促使非故障交流系统所连电压源型换流器(VSC)消纳不平衡功率参与频率调节。然而固定下垂系数灵活性不足,在不平衡功率分配时忽略VSC实时运行状态与交流网络稳定性,无法保证系统参与频率调整的同时安全稳定运行。通过研究频率变动造成的功率不平衡量分配和直流电压下垂系数的定量关系,提出一种计及系统运行状态的VSC-MTDC动态附加频率控制策略,将VSC功率裕度和交流网络频率变化量引入下垂系数,动态调整不平衡功率的分配比例。仿真结果证明,应用动态附加频率控制进行频率调节后,频率偏差较小的交流网络在所连VSC功率裕度较大时能承担更多不平衡功率,而频率偏差较大的交流网络所连换流站不平衡功率配比下降,VSC-MTDC系统安全稳定运行水平得到显著改善。

关键词:基于电压源型换流器的多端柔性直流输电;动态附加频率控制;动态直流电压下垂系数;频率偏差量;功率裕度

中图分类号:TM 721.1;TM 761

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202109025

0 引言

相比传统电网换相型直流输电(LCC-HVDC)系统,基于电压源型换流器(VSC)或模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流输电系统,凭借有功/无功功率独立控制及没有换相失败等优点获得了广泛应用^[1-3]。基于VSC的多端柔性直流输电(VSC-MTDC)系统运行模式灵活多样,具有广大发展远景^[4-6]。维持系统频率稳定一直是交直流系统的重点研究对象。VSC-MTDC系统协助交直流混合系统维持频率稳定的主要方式是在VSC-MTDC系统控制策略上附加频率控制,以改善故障交流系统的频率稳定性。

VSC-MTDC系统功率协调控制存在以下3类模式,分别为主从控制、裕度控制和下垂控制^[7]。主从控制方式下,VSC从站控制传输的功率,主站控制柔性直流网络的直流电压,以保证能量均衡。主从控制方式运行简便,但站间需要通信,且只能由换流站主站承担系统功率波动时的不平衡量。裕度控制在主从控制的基础上,分级预设多个电压控制主站,以便在上级主站到达功率限额后接管系统电压控制。裕度控制方式下,电压裕度整定复杂,分级主站配合繁琐。下垂控制通常由多个VSC共同维持柔性直流网络直流电压稳定和能量均衡。下垂控制方式可以发挥多个换流站的平衡作用,且不需要站间通信,在VSC-MTDC协调控制中获得了广泛应用。

下垂控制方式下,交流系统突然发生故障后,本侧换流站无法响应频率变动,因此其余正常交流系

统无法依靠VSC-MTDC系统实施功率支援,频率调整只由故障交流系统自身调频能力决定^[8]。文献[9]将频率外环输出叠加到换流站下垂控制功率参考值上,使换流站能响应交流系统频率变化。文献[10]在文献[9]的基础上增加了附加频率控制的运行死区,避免了系统频率频繁波动。文献[11]按分级分区的原则设定附加频率控制的启动顺序。文献[12]在附加频率控制的基础上设计了直流电压控制环,用于实现稳态后的直流电压恢复。文献[13-14]将频率变化量引入频率下垂系数,能够根据频率偏差动态调整系统支援的功率。文献[15]在站间通信的基础上通过不同交流系统的频率差和频率变化率之差进行频率调整。文献[16-17]将附加频率控制与虚拟同步控制技术相结合,同时控制频率偏差和频率变化率,实现了VSC-MTDC系统的频率调整。然而,当前设计的VSC-MTDC系统附加频率控制没有协调考虑VSC实时运行状态与非故障交流系统承受不平衡功率的能力,可能导致换流站传输功率逼近限额或交流系统承担不平衡功率失衡,威胁交直流系统安全稳定运行。

针对上述问题,设计了在线调整VSC-MTDC系统直流电压下垂系数的动态附加频率控制方法。通过分析不平衡功率在非故障换流站之间的分配关系,将交流系统频率偏差和换流站功率裕度引入直流电压下垂系数在线调整环节,根据VSC实时功率调整能力与交流系统频率状况动态调节不平衡功率分配比例。通过在PSCAD/EMTDC仿真平台上建立四端柔性直流系统模型来验证负荷突增、机械转矩骤减、换流站退出运行等状况下动态附加频率控制的有效性。

收稿日期:2020-12-13;修回日期:2021-07-29

基金项目:国家电网公司科技项目(2019-579)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(2019-579)

1 附加频率控制的功率分配关系

1.1 附加频率控制基本原理

为了使下垂控制在故障交流系统频率变化时发挥作用,通常采用频率附加控制^[9]使非故障换流站提供功率支援,其控制框图见图1。图中, U_{dc} 和 U_{dcref} 分别为VSC直流侧电压实测值和参考值; P 和 P_{ref}^* 分别为VSC传输的有功功率实测值和参考值; f 和 f^* 分别为VSC所连交流网络频率实测值和参考值; Δf 为交流网络频率偏差; ΔP_{ref} 为附加频率控制引起的有功功率参考值增量; K_f 为频率下垂控制系数; K_V 为直流电压下垂系数; i_{dref} 为有功外环控制输出的 d 轴电流参考值。

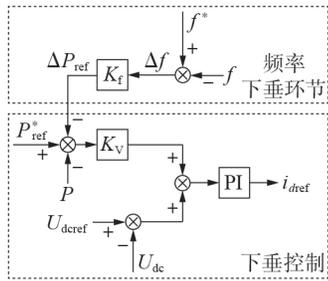


图1 附加频率控制的控制框图

Fig.1 Control block diagram of additional frequency control

附加频率控制基于直流电压下垂控制,将交流系统频率偏差引起的功率参考值增量叠加到VSC稳态功率参考值上,从而将单个交流系统的频率变化通过直流电压的变化传递到整个直流网络,进而引起其余换流站消纳故障交流系统的不平衡功率。

1.2 扰动后直流网络电压偏差

含附加频率控制的直流电压-有功功率特性由式(1)表示。

$$(U_{dcref} - U_{dc}) + K_V (P_{ref} - P) = 0 \quad (1)$$

式中: P_{ref} 为有功功率实际指令值,由两部分组成,如式(2)所示。

$$P_{ref} = P_{ref}^* - \Delta P_{ref} \quad (2)$$

附加频率控制对应的频率-有功功率指令值特性由式(3)表示。

$$\Delta P_{ref} = K_f (f^* - f) \quad (3)$$

把式(2)、(3)代入式(1),整理可得:

$$P_{ref}^* - P = -\frac{1}{K_V} (U_{dcref} - U_{dc}) + K_f (f^* - f) \quad (4)$$

简记为:

$$\Delta P = -\frac{1}{K_V} \Delta U_{dc} + K_f \Delta f \quad (5)$$

式中: $\Delta P = P_{ref}^* - P$; $\Delta U_{dc} = U_{dcref} - U_{dc}$; $\Delta f = f^* - f$ 。

若考虑直流网络损耗,VSC_j直流侧初始稳态有功功率 P_{j0} 为:

$$P_{j0} = U_{dcj0} \sum \frac{U_{dcj0} - U_{dck0}}{R_{jk}} \quad (6)$$

式中: $j, k = 1, 2, \dots, n$,其中 n 为换流站数量; U_{dcj0} 为VSC_j初始稳态直流电压; R_{jk} 为与VSC_j相连的VSC_k间的线路电阻。

假设在初始时刻交流系统频率均为额定频率,则VSC直流电压下垂控制满足:

$$K_{Vj} \Delta P_{j0} + \Delta U_{dcj0} = 0 \quad (7)$$

式中: $\Delta P_{j0} = P_{ref}^* - P_{j0}$; $\Delta U_{dcj0} = U_{dcref} - U_{dcj0}$ 。

联立式(6)、(7),利用数值计算方法进行求解,可得VSC-MTDC系统初始稳态有功功率和直流电压。

考虑VSC-MTDC系统能量守恒,有:

$$\sum_{j=1}^n P_{j0} + P_{loss} = 0 \Leftrightarrow P_{loss} = -\sum_{j=1}^n \Delta P_{j0} \quad (8)$$

式中: P_{loss} 为直流网络损耗。

假设频率扰动后的动态过程中直流网络损耗不变,则各VSC对应的 ΔU_{dc} 相同。频率扰动后的VSC附加频率控制满足:

$$\Delta P_{j0} + \Delta P_{j1} = -\frac{1}{K_{Vj}} (\Delta U_{dcj0} + \Delta U_{dc1}) + K_{fj} \Delta f_j \quad (9)$$

式中: $\Delta P_{j1} = P_{j0} - P_{j1}$, P_{j1} 为频率扰动后的VSC_j稳态传输功率; ΔU_{dc1} 为频率扰动前后直流电压变化量。

将式(7)代入式(9),可得:

$$\Delta P_{j1} = -\frac{1}{K_{Vj}} \Delta U_{dc1} + K_{fj} \Delta f_j \quad (10)$$

对 n 个换流站稳态传输功率进行求和,根据式(8),可得:

$$\Delta U_{dc1} = \frac{1}{\sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{Vj}}} \left(-P_{loss} + \sum_{j=1}^n K_{fj} \Delta f_j \right) \quad (11)$$

式(11)显示直流电压偏差量与各换流站直流电压下垂系数、直流网络损耗、频率下垂系数及交流系统频率偏差量相关。这表明附加频率控制将VSC-MTDC系统所连交流网络频率与直流电压相耦合。

1.3 扰动后换流站功率增量

把式(11)代入式(10),则VSC_m分配的功率增量为:

$$\Delta P_{m1} = -\frac{1}{K_{Vm} \sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{Vj}}} \left(-P_{loss} + \sum_{j=1}^n K_{fj} \Delta f_j \right) + K_{fm} \Delta f_m \quad (12)$$

由式(12)可知,各换流站承担的不平衡功率不仅与自身的频率变化相关,还与其余换流站的频率变化相关。

由于任意时刻多个交流系统同时产生功率缺额的可能性较小,因此除故障交流系统频率偏差较大外,其余交流系统的频率偏差均较小。若忽略非故

障交流系统频率偏差,式(12)可以转化为:

$$\begin{cases} \Delta P_{i1} = K_{fi} \left(1 - \frac{1}{K_{Vi} \sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{Vj}}} \right) \Delta f_i + \frac{P_{\text{loss}}}{K_{Vi} \sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{Vj}}} \\ \text{VSC}_i \text{ 为故障站} \\ \Delta P_{k1} = -\frac{1}{K_{Vk} \sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{Vj}}} K_{fi} \Delta f_i + \frac{P_{\text{loss}}}{K_{Vk} \sum_{j=1}^n \frac{1}{K_{Vj}}} \\ \text{VSC}_k \text{ 为非故障站} \end{cases} \quad (13)$$

为简化描述,下文将式(13)中故障交流网络所连VSC简称为故障站,非故障交流网络所连VSC简称为非故障站。可以看出,无论是故障站还是非故障站,其承担的不平衡功率都与故障站VSC_i的频率偏差呈强相关,此外换流站直流电压下垂系数和频率下垂系数以及直流网络损耗都将影响功率不平衡量分配。

设VSC_i为故障站,VSC_k、VSC_m为非故障站。根据式(13),各换流站不平衡功率比例为:

$$\Delta P_i : \Delta P_k : \Delta P_m = \frac{P_{\text{loss}} + K_{fi} \Delta f_i \left(K_{Vi} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{K_{Vj}} \right)}{K_{Vi} (P_{\text{loss}} - K_{fi} \Delta f_i)} : \frac{1}{K_{Vk}} : \frac{1}{K_{Vm}} \quad (14)$$

由于 P_{loss} 通常较小,将其忽略后式(14)可简化为:

$$\Delta P_i : \Delta P_k : \Delta P_m = -\sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{K_{Vj}} : \frac{1}{K_{Vk}} : \frac{1}{K_{Vm}} \quad (15)$$

这表明在忽略非故障站频率偏差的情况下,各换流站承担的不平衡功率比例仅和直流电压下垂系数相关。非故障站不平衡功率比例与直流电压下垂系数成反比,与非故障站频率下垂系数无关。故障站不平衡功率比例系数为其余非故障站直流电压下垂系数倒数之和的相反数,这与故障站出现频率下跌时,非故障站增出力、故障站减出力的实际情况相吻合。

附加频率控制本质上是在P-V曲线上修改运行点,通过改变运行点的直流电压进行功率再分配,把故障系统的不平衡功率通过直流网络分配到非故障交流系统。式(14)、(15)揭示了非故障站承担的功率增量比例,固定的直流电压下垂系数忽视了交流系统实时频率状况,可能造成交流系统承担的不平衡功率超出承受范围,威胁交流系统自身的安全运行。

2 动态附加频率控制

为了避免上述问题的发生,本文设计了动态附加频率控制,其基本思想是在现有附加频率控制的基础上,动态调节换流站直流电压下垂系数,增大连接强系统且功率裕度较大换流站出力配比,充分利

用非故障系统的支援能力,避免威胁自身安全的同时对故障侧进行更好的支援。

由式(14)、(15)可以看出,非故障站承担功率增量的比例与直流电压下垂系数成反比, K_v 越大,承担的功率增量越少。因此,考虑非故障交流系统的功率支援能力与换流站可调节潜力,将交流系统频率偏差和换流站功率裕度引入 K_v ,使得频率偏差越大或功率裕度越小的VSC拥有越大的 K_v ,从而根据交流系统和换流站的实时运行工况调节VSC分配的功率增量比例。

用 P_{max} 与 P_{min} 分别表示VSC允许运行的最大和最小功率,用 U_{dcmx} 与 U_{dcmin} 分别表示VSC允许运行的最大和最小直流电压,则换流站的运行区间可以用图2表示。

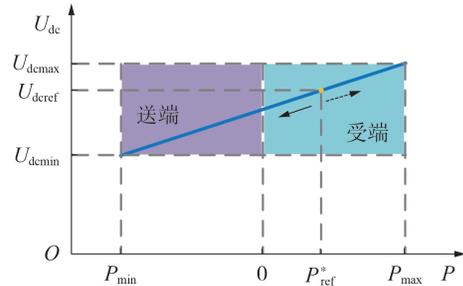


图2 换流站运行区间

Fig.2 Operation region of converter station

当 $\Delta P > 0$ 时,换流站运行点沿图2中的实线箭头移动,此时换流站功率最大可调节裕度为 $P_{\text{ref}}^* - P_{\text{min}}$,功率裕度可表示为 $\frac{\Delta P}{P_{\text{ref}}^* - P_{\text{min}}}$,该值越接近于1,VSC

功率裕度越小。进一步地,送端换流站的运行点向最小功率点移动,此时送端换流站存在功率裕度问题;而受端换流站是背离换流站最大功率点移动的,实际上不存在功率裕度问题。因此,当 $\Delta P > 0$ 时,动态直流电压下垂系数采用式(16)计算。

$$K_v = K_{v0} (1 + \alpha \Delta f) \left(1 + \beta \frac{\Delta P}{P_{\text{ref}}^* - P_{\text{min}}} \right) \quad (16)$$

式中: K_{v0} 为不使用附加频率控制时换流站的直流电压下垂系数,一般与换流站容量成反比^[18]; α 为频率偏差系数; β 为功率裕度系数,当 $\Delta P > 0$ 时,受端换流站的 $\beta = 0$ 。

当 $\Delta P < 0$ 时,换流站运行点沿图2中虚线箭头移动,此时换流站功率最大可调节裕度为 $P_{\text{max}} - P_{\text{ref}}^*$,功率裕度为 $\frac{-\Delta P}{P_{\text{max}} - P_{\text{ref}}^*} = \frac{\Delta P}{P_{\text{ref}}^* - P_{\text{max}}}$ 。此时受端换流站的

运行点向最大功率点移动,存在功率裕度问题;而送端换流站运行点沿着最小功率点反向运行,不存在功率裕度问题。因此,当 $\Delta P < 0$ 时,动态直流电压下垂系数采用式(17)计算。

$$K_V = K_{V0}(1 + \alpha \Delta f) \left(1 + \beta \frac{\Delta P}{P_{ref}^* - P_{max}} \right) \quad (17)$$

式中:当 $\Delta P < 0$ 时,送端换流站的 $\beta = 0$ 。

预设下垂系数参数时,令各端换流站频率偏差系数 α 和功率裕度系数 β 保持一致,在保证下垂控制稳定性的前提下,尽可能提高参数设定值,以放大不同交流系统的频率变化和VSC功率裕度变化,实现根据系统实时状态动态调整下垂系数。

结合式(16)、(17),稳态运行时, Δf 和 ΔP 均等于0,动态直流电压下垂系数 K_V 与不使用附加频率控制时的直流电压下垂系数 K_{V0} 相等。

频率调整过程中,动态附加频率控制的直流电压下垂系数同交流系统频率偏差 Δf 和换流站功率裕度 $\frac{\Delta P}{P_{ref}^* - P_{min}}$ 或 $\frac{\Delta P}{P_{ref}^* - P_{max}}$ 呈正相关,交流系统频率偏差越大,VSC功率裕度越小,动态下垂系数 K_V 越大,承担的不平衡功率比重越小。

当正常交流系统频率偏差达到最大允许偏差或换流站传输功率达到功率极限时,VSC控制模式转为采用定功率控制,不再提供更多的支援功率,优先维持自身稳定运行。

根据上述分析,动态附加频率控制框图如图3所示。图中, f_h 为附加频率控制动作上阈值, f_l 为动作下阈值,设置该死区可以有效避免频率微小变动引起系统状态反复变化。当交流系统频率变动越过死区后,附加频率控制发挥作用,实现功率支援。动态直流电压下垂系数引入了交流系统的频率变化和换流站的功率裕度,在VSC潜在可调节范围较大时提高强交流系统不平衡功率配比,降低弱交流网络功率增量配比,增强VSC-MTDC系统的稳定运行能

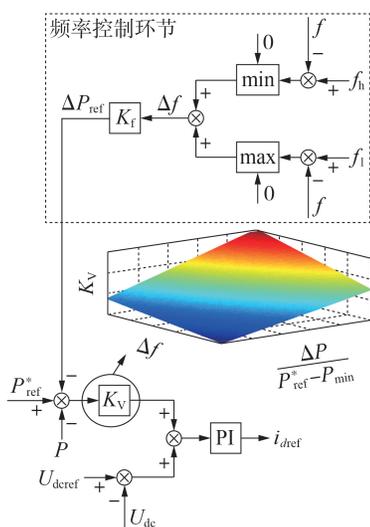


图3 动态附加频率控制框图

Fig.3 Block diagram of dynamic additional frequency control

力。为了避免附加频率控制过度功率支援造成直流网络电压大范围偏移,为应用附加频率控制的VSC设计了直流电压运行死区。当直流电压变化量超过0.1 p.u.时,VSC由采用动态附加频率控制转为采用定有功功率控制。

3 仿真实验

3.1 仿真模型

本文在PSCAD/EMTDC仿真平台上建立了如图4所示的四端柔性直流系统模型来验证所提动态附加频率控制的有效性。交流网络电压有效值为110 kV,额定频率为50 Hz,AC₁—AC₄的容量分别为300、200、350、250 MV·A。送端换流站VSC₁、VSC₂的有功功率参考值均为100 MW,受端换流站VSC₃、VSC₄的有功功率参考值分别为-120、-80 MW。直流网络的直流电压参考值为200 kV。VSC₁—VSC₄的直流电压下垂系数分别为0.4、0.4、0.33和0.5。

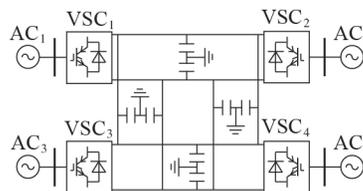


图4 四端柔性直流系统

Fig.4 Four-terminal flexible DC system

本文设计了以下3种仿真情形进行仿真分析:交流系统负荷突然增加;交流系统发电机机械转矩突然降低;某个换流站因故障退出运行。

3.2 交流系统负荷突然增加

$t = 8$ s时,AC₁所连母线突然增加有功负荷20 MW,交流系统频率及对应换流站有功功率曲线分别见图5和图6。设 $f_1 - f_4$ 和 $\Delta f_1 - \Delta f_4$ 分别为AC₁—AC₄的频率及其变化量, $P_1 - P_4$ 和 $\Delta P_1 - \Delta P_4$ 分别为VSC₁—VSC₄传输的有功功率及其变化量。可以看出,不采用附加频率控制时, f_1 跌落至49.34 Hz, $f_2 - f_4$ 维持50 Hz不变,4个换流站传输的有功功率维持不变,AC₁仅凭借自身频率调节效应来平衡功率缺额。采用附加频率控制后,其余换流站根据直流电压的变化对故障交流网络进行功率增援, Δf_1 降至0.19 Hz, Δf_2 变为0.102 Hz, Δf_3 变为0.024 Hz, Δf_4 变为0.032 Hz; $\Delta P_1 - \Delta P_4$ 分别为-11.0、3.7、4.3、3.0 MW。虽然AC₁在获得其余换流站的功率支援后频率下跌情况取得了极大改善,但是强度较弱的AC₂按照固定下垂系数模式分配不平衡功率,其频率变化超过了0.1 Hz,不利于AC₂自身的稳定。

若采用文献[13]所提自适应附加频率控制, Δf_1 仍为0.19 Hz, Δf_2 降至0.049 Hz, Δf_3 升至0.031 Hz, Δf_4 升至0.037 Hz; ΔP_1 维持-11.0 MW, ΔP_2 下降至1.8 MW, ΔP_3 升至5.5 MW, ΔP_4 升至3.7 MW。而采用

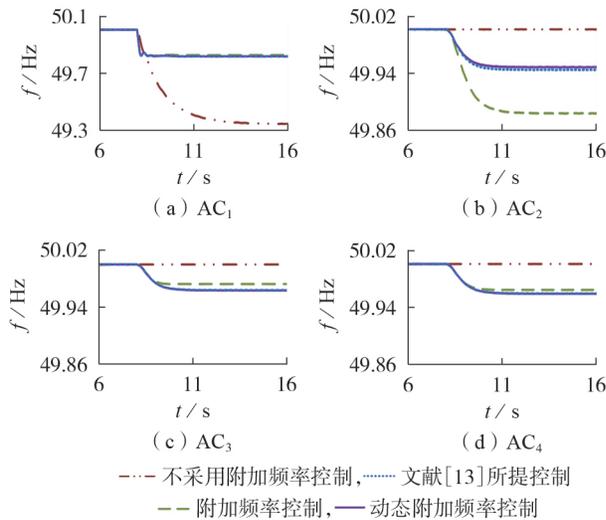


图5 交流系统频率

Fig.5 Frequency of AC systems

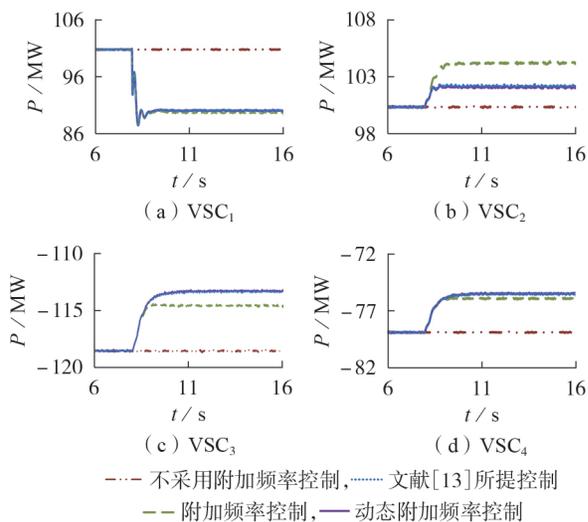


图6 换流站传输的有功功率

Fig.6 Power transmission of converter stations

动态附加频率控制后 Δf_1 仍为 0.19 Hz, $\Delta f_2 - \Delta f_4$ 分别为 0.045、0.033、0.036 Hz; ΔP_1 保持 -11.0 MW 不变, $\Delta P_2 = 1.7$ MW, $\Delta P_3 = 5.8$ MW, $\Delta P_4 = 3.5$ MW。动态附加频率控制通过动态调节直流电压下垂系数, 频率变化较小的强交流系统 AC₃ 和 AC₄ 承担了更多的不平衡功率, 较弱交流系统 AC₂ 的频率变化相比采用附加频率控制时明显减小, 在保证强交流系统稳定的同时明显提高了弱交流系统的稳定运行能力。

仿真结果显示, 交流系统负荷突增后, 当换流站功率裕度较大时, 无论是采用动态附加频率控制还是文献[13]所提控制, 相较于传统频率控制都可以有效改善弱交流系统的频率状况。

3.3 交流系统发电机机械转矩突然降低

$t=8$ s 时, AC₁ 发电机机械功率突然减少 20%, 交流系统频率和对应换流站的有功功率变化曲线分别见附录 A 图 A1 和图 A2。可以看出, 不采用附加

频率控制时, Δf_1 为 0.65 Hz, $\Delta f_2 - \Delta f_4$ 均为 0, 换流站不对故障系统进行功率支援。而采用附加频率控制后, Δf_1 降至 0.18 Hz, $\Delta f_2 - \Delta f_4$ 分别为 0.105、0.024、0.033 Hz; $\Delta P_1 = -11.2$ MW, $\Delta P_2 = 3.8$ MW, $\Delta P_3 = 4.3$ MW, $\Delta P_4 = 3.1$ MW。VSC-MTDC 系统达到新稳态后, 故障交流系统频率下跌明显减少, 然而弱交流系统 AC₂ 承担不平衡功率后频率变化达到 0.105 Hz, 对 AC₂ 的平稳运行较为不利。

在采用文献[13]所提自适应附加频率控制之后, Δf_1 保持 0.18 Hz 不变, Δf_2 降至 0.050 Hz, Δf_3 升至 0.032 Hz, Δf_4 升至 0.037 Hz; ΔP_1 保持 -11.2 MW 不变, ΔP_2 降至 1.9 MW, ΔP_3 升至 5.6 MW, ΔP_4 升至 3.7 MW。而采用动态附加频率控制后, Δf_1 仍维持 0.18 Hz 不变, $\Delta f_2 - \Delta f_4$ 分别为 0.048、0.033、0.036 Hz; ΔP_1 保持 -11.2 MW 不变, $\Delta P_2 = 1.8$ MW, $\Delta P_3 = 5.9$ MW, $\Delta P_4 = 3.5$ MW。动态附加频率控制将交流系统频率偏差量引入直流电压下垂系数后, 提高了频率变化较小的强交流系统 AC₃ 和 AC₄ 的不平衡功率配比, 降低了较弱交流系统 AC₂ 的不平衡功率配比, 改善了 VSC-MTDC 及交流系统的运行状况。

仿真研究表明, 发电机机械转矩骤减后, 当换流站功率裕度较大时, 采用动态附加频率控制和文献[13]所提控制都可以显著降低弱交流系统的频率偏移。

3.4 换流站 1 因故退出运行

$t=8$ s 时, VSC₁ 因为故障退出运行, 系统相关电气量的变化情况见图 7。可以看出, 不采用附加频率控制时, $\Delta f_2 - \Delta f_4$ 分别为 0.90、0.23、0.27 Hz, $\Delta P_2 - \Delta P_4$ 分别为 37.7、37.4、24.9 MW。根据文献[19]提出的换流站功率极限计算方法, 可得 VSC₂ 功率极限为 137.7 MW。VSC₁ 退出运行后, VSC₂ 承担不平衡功率太多以至于达到功率极限, 同时 AC₂ 频率降至 49.1 Hz 之下, 严重威胁 VSC-MTDC 系统稳定运行。

采用附加频率控制后, Δf_2 仍为 0.90 Hz, Δf_3 升至 0.24 Hz, Δf_4 降至 0.25 Hz; ΔP_3 升至 38.8 MW, ΔP_4 降至 23.5 MW, 而 VSC₂ 的准稳态功率依然达到功率极限, AC₂ 频率状况仍未改善。

采用文献[13]所提自适应控制之后, Δf_2 下降至 0.63 Hz, Δf_3 和 Δf_4 分别升至 0.28 Hz 和 0.30 Hz; ΔP_2 降至 26.9 MW, 而 ΔP_3 和 ΔP_4 分别升至 45.5 MW 和 27.6 MW。相较于原始附加频率控制, 虽然 AC₃ 和 AC₄ 承担的不平衡功率略有增加, 但是 VSC₂ 的准稳态功率依然很接近功率极限, AC₂ 频率仍然较低, VSC₂ 和 AC₂ 承受功率波动的能力较差。

采用动态附加频率控制之后, Δf_2 大幅下降至 0.35 Hz, Δf_3 变为 0.33 Hz, Δf_4 变为 0.34 Hz; ΔP_2 降至 14.6 MW, ΔP_3 变为 54.6 MW, ΔP_4 变为 30.8 MW。此时 3 个交流系统的频率变化量都在 0.35 Hz 以内, VSC₂

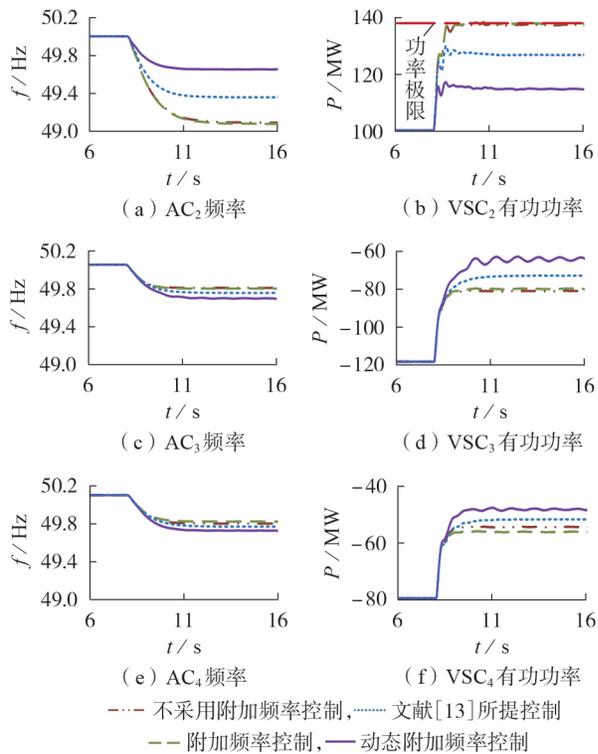


图 7 交流网络频率及换流站传输有功功率
Fig.7 Frequency of AC systems and power transmission of converter stations

传输的有功功率明显低于功率极限,强交流系统 AC₃和 AC₄承担了更多的不平衡功率。仿真波形揭示了在换流站功率严重偏离参考值时,动态附加频率控制相比于文献[13]所提控制,能有效避免换流站传输功率达到功率极限,从而改善 VSC 运行条件。

综上,动态附加频率控制能够凭借交流系统频率变化量以及 VSC 功率裕度,动态调整换流站分担功率增量的比例,在维持不同强度交流网络频率相对稳定的同时尽量保留换流站调节能力,保证 VSC-MTDC 系统运行于相对稳定水平。

4 结论

本文设计了适用于 VSC-MTDC 系统的动态附加频率控制,并进行了动态运行特性分析,所得结论如下。

1)基于直流电压下垂控制的附加频率控制在分配不平衡功率时,非故障换流站承担的不平衡功率近似与直流电压下垂系数成反比,故障换流站的不平衡功率为非故障换流站不平衡功率之和的相反数。

2)VSC-MTDC 系统的动态附加频率控制将交流系统频率偏差和 VSC 功率裕度引入直流电压下垂系数,根据换流站实时运行情况和交流系统频率特性动态调整下垂系数,将不平衡功率更多地分配到连接强交流系统且功率裕度较大的换流站,避免弱交流系统频率出现较大偏移。

3)在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上建立了四端柔性直流系统模型,通过研究交流系统负荷突增、原动机机械转矩骤减和换流站因故退出运行等情况下 VSC-MTDC 系统的响应特性,验证了动态附加频率控制作用。仿真结果说明,使用动态附加频率控制策略,强交流系统承担了更多不平衡功率,弱交流系统频率偏差显著减小,换流站保留一定功率调节能力,整个交直流系统的稳定运行能力得到大幅改善。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] AKSHAYA M, DASH P K. Input-output linearization and robust sliding-mode controller for the VSC-HVDC transmission link[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1952-1961.
- [2] ROLF O, JAN S. Vector current controlled voltage source converter-deadbeat control and saturation strategies[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17(2): 279-285.
- [3] 孙吉波,王宇,刘崇茹,等. 基于 MMC 的多端直流电网双极短路故障电流计算[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(11): 72-78. SUN Jibo, WANG Yu, LIU Chongru, et al. Pole-to-pole short circuit current calculation of multi-terminal DC grid based on MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(11): 72-78.
- [4] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17. TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [5] 阎发友,汤广福,贺之渊,等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 397-404. YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 397-404.
- [6] 严铭,蔡晖,谢珍建,等. 适用于多端柔性直流输电系统的分布式直流电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 134-140. YAN Ming, CAI Hui, XIE Zhenjian, et al. Distributed DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 134-140.
- [7] 徐殿国,刘瑜超,武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 1-12. XU Dianguo, LIU Yuchao, WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 1-12.
- [8] 朱良合,袁志昌,盛超,等. 基于柔性直流输电的异步互联系统频率支援控制方法综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 84-92. ZHU Lianghe, YUAN Zhichang, SHENG Chao, et al. Review of frequency support control methods for asynchronous interconnection system based on VSC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 84-92.
- [9] NILANJAN R C, RAJAT M, BALARKO C. System frequency support through Multi-Terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 347-356.
- [10] 朱瑞可,李兴源,应大力. VSC-MTDC 互联系统频率稳定控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2729-2734. ZHU Ruike, LI Xingyuan, YING Dali. A frequency stability con-

- trol strategy for interconnected VSC-MTDC transmission system[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2729-2734.
- [11] 周密, 徐箭, 孙元章. 多端柔性直流电网跨区域平抑风电波动的协调控制方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(12): 29-35. ZHOU Mi, XU Jian, SUN Yuanzhang. Coordinated control restraining wind power fluctuation of VSC-MTDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 29-35.
- [12] 袁志昌, 吴志力, 金强, 等. 含直流电压二次调节的VSC-MTDC互联系统频率稳定控制[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(23): 9-13, 19. YUAN Zhichang, WU Zhili, JIN Qiang, et al. Frequency stabilization control strategy with DC voltage secondary regulation of VSC-MTDC based interconnected systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(23): 9-13, 19.
- [13] 王伟宇, 李勇, 曹一家, 等. 参与电网调频的多端柔性直流输电系统自适应下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 142-149, 161. WANG Weiyu, LI Yong, CAO Yijia, et al. Adaptive droop control strategy participating in power grid frequency regulation for VSC-MTDC transmission systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(13): 142-149, 161.
- [14] 翟冬玲, 韩民晓, 马骏鹏, 等. 连接低惯量系统的VSC-MTDC的自适应下垂控制[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 128-134. ZHAI Dongling, HAN Minxiao, MA Junpeng, et al. Adaptive droop control of VSC-MTDC connected to low inertia system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 128-134.
- [15] DAI J, PHULPIN Y, SARLETTE A, et al. Coordinated primary frequency control among non-synchronous systems connected by a multi-terminal high-voltage direct current grid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(2): 99-108.
- [16] ZHU J, CAMPBELL D B, GRAIN P A, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.
- [17] WANG R, CHEN L, ZHENG T, et al. VSG-based adaptive droop control for frequency and active power regulation in the MTDC system[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(3): 260-268.
- [18] 彭乔, 刘天琪, 张英敏, 等. 考虑功率裕度与系统稳定性的直流电网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(12): 3498-3506. PENG Qiao, LIU Tianqi, ZHANG Yingmin, et al. Adaptive droop control of VSC based DC grid considering power margin and system stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(12): 3498-3506.
- [19] 陆韶琦, 徐政. 采用功率同步控制的MMC-HVDC功率极限分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(7): 1868-1876. LU Shaoqi, XU Zheng. Analysis of the maximum power flow in power synchronization control based MMC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(7): 1868-1876.

作者简介:



刘昊宇

刘昊宇(1994—),男,内蒙古包头人,博士研究生,主要研究方向为柔性直流输电系统协调控制(E-mail: haoyu_l@126.com);

刘崇茹(1977—),女,陕西西安人,教授,博士研究生导师,通信作者,主要研究方向为交、直流输电系统及其控制(E-mail: chongru.liu@ncepu.edu.cn);

蒋思雯(1997—),女,湖南常德人,硕士研究生,主要研究方向为风机次同步振荡分析及其控制(E-mail: 1141720594@qq.com)。

(编辑 李玮)

Dynamic additional frequency control strategy for VSC-MTDC transmission system

LIU Haoyu, LIU Chongru, JIANG Siwen

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The additional frequency control utilizes the DC voltage variation of VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) system to represent the frequency variation of the AC system with faults. In this way, the VSC connected to non-fault AC system is assigned to accommodate the unbalanced power and participate in frequency regulation. However, the flexibility of the DC voltage droop control with constant coefficients is relatively insufficient. The real-time operation status of VSC and the stability of AC system are neglected when allocating the unbalanced power among all remaining non-fault AC systems, which cannot guarantee that the operation of VSC-MTDC is secure and stable. By analyzing the quantitative relationship between the unbalanced power distribution caused by the frequency variation and DC voltage droop coefficient, a dynamic additional frequency control strategy of VSC-MTDC is proposed. The frequency deviation of the AC systems and the power margin of the VSCs are introduced into the DC voltage droop coefficient to dynamically adjust the unbalanced power distribution ratio. The simulative results show that, by adopting the proposed strategy, the AC system with smaller frequency deviation can accommodate higher level of unbalanced power when the connected VSC power margin is large, while the unbalanced power distribution ratio of VSCs connected to the AC systems with larger frequency deviation is reduced dramatically. Therefore, the proposed control strategy effectively improves the secure operating ability of VSC-MTDC system.

Key words: VSC-MTDC power transmission; dynamic additional frequency control; dynamic DC voltage droop coefficient; frequency deviation; power margin

附录 A

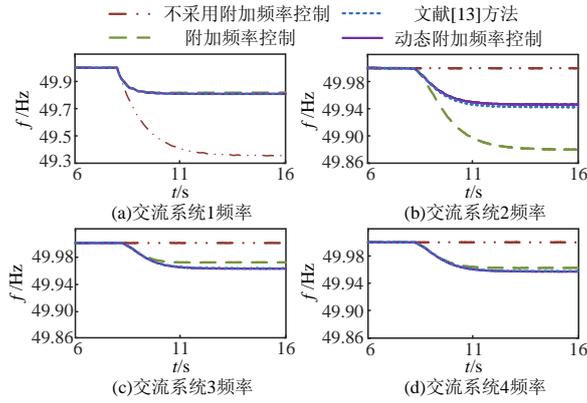


图 A1 交流系统频率

Fig.A1 AC system frequency

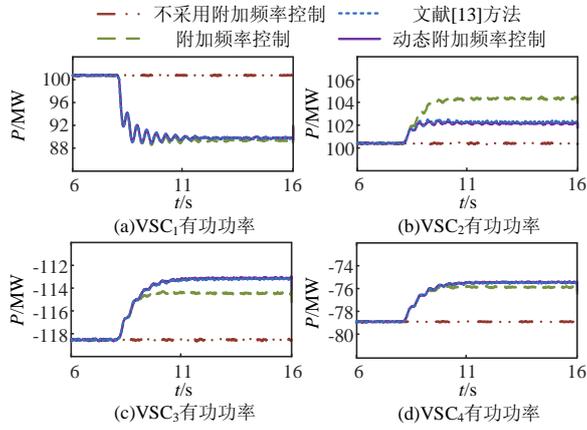


图 A2 换流站有功功率

Fig.A2 Real power transmission for VSC