

[直流输电]

自适应电压下垂的 MT-HVDC 附加频率控制策略

文/宁夏大学物理与电子电气工程学院 宁夏电力能源安全重点实验室 马岩 潘欢 纳春宁

在柔性高压直流输电系统中, PI 双环解耦电流控制的电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 难以为 AC 区域提供频率支持, 传统电压下垂控制导致直流电压在系统发生扰动后出现较大偏移。设计一种基于自适应下垂控制器的依赖通信链路的频率附加控制策略, 在 AC 区域发生扰动后实现频率支持。

柔性多端高压直流输电 (Voltage Source Converter-Multi Terminal High Voltage DC, VSC-MTDC) 相比高压交流输电 (High Voltage AC, HVAC) 更具成本与性能优势。使用电压源型换流器 (Voltage Source Converter, VSC) 将多个孤立 AC 区域或 WPP 连接到高压直流输电 (High Voltage DC, HVDC) 网络中, 实现功率相互传输和异步互联的输电系统称为 VSC-MTDC 系统。对于 VSC 的控制研究主要基于电流矢量控制, 然而传统 PI 双环解耦电流控制无法使 VSC-MTDC 对 AC 区域频率变化做出响应, 导致孤立 AC 区域惯性降低, 使频率对功率不平衡扰动变得更加敏感, 对电网的安全稳定运行产生消极影响。因此有必要考虑在 VSC 控制器中增加额外的频率附加控制, 使经由 VSC-MTDC 并网的 WPP 能通过共享功率裕度参与交流区域频率调节。

目前国内外学者针对 VSC 中附加频率控制的研究主要有以下几种: 通过直流电压传递频率偏差的主从控制、附加频率调节的下垂控制、基于虚拟同步发电机的控制方法及基于站间通信的主从式控制。这些方法主要是对通过 MT-HVDC 连接的异步 AC 电网之间进行频率控制, 但都忽略了 WPP 并网情况。对于具有 WPP 并网情况下的频率附加控制研究主要有: J. Morren、W. L. Kling 和 J. A. Ferreira 于 2006 年提出的使用风力涡轮机转子动能来提供功率裕度的方法, 但是存在较大扰动时可能会使风力电机转速过低, 甚至停止运行的风险; 2010 年 J. Dai、Y. Phulpin、A. Sarlette 和 D. Ernst 等人提出了在海上 WPP 侧的 VSC 中, 增加基于通信的频率控制环节实现对孤立 AC 区域频率支持; Fernando D. Bianchi 在 2015 年提出了基于频率一致性的控制策略, 实现了 WPP 共享功率裕度并进行频率支持; 2018 年 Fernando D. Bianchi 提出了考虑通信链路较少的频率一致性控制策略控制方法, 减少了区域之间的信息传输, 简化了实现过程, 提高了系统可靠

基金项目: 国家自然科学基金 (61763040); 第三批宁夏青年科技人才托举工程 (TJGC2018095)。

性。上述研究都未考虑直流电压偏差过大的问题。

在上述分析的基础上,本文提出基于自适应电压下垂的 VSC-MTDC 附加频率控制策略,通过在 AC 侧的 VSC 有功控制环上增加频率一致性控制,在 WPP 侧 VSC 中增加基于 AC 区域频率的 PI 控制,实现各个区域共享功率裕度,实现对 AC 区域频率支持。同时,提高直流电压稳定性,防止电压越限。

多端 HVDC 系统模型

连接 n 个 AC 区域、 m 个风电场的 MT-HVDC 系统,如图 1 所示。在实际的直流系统中,AC 区域通常包括多个发电机和负载。在较短的控制时间内,使用聚合模型来表示 AC 区域内的发电机和负载。式 (1) 表示第 i 个 AC 区域的角频率动态变化。

$$2H_i \frac{d\omega_i}{dt} = \frac{P_{mi} - P_{li} - P_i^{dc}}{\omega_i} - D_{gi}(\omega_i - \omega_{nom,i}) \quad (1)$$

式中, ω_i 为区域 i 的角频率,等于 $2\pi f_i$; f_i 为区域 i 的频率; P_{mi} 、 P_{li} 和 P_i^{dc} 分别为发电机机械功率、负载总功率和区域 i 通过 VSC 注入直流电网的功率; H_i 为惯性时间常数,表示为

$$H_i = \frac{J_i \omega_{nom,i}^2}{2S_0} \quad (2)$$

式中, $\omega_{nom,i}$ 为额定角频率; J_i 为转矩惯量; S_0 为功率的参考值; D_{gi} 为区域 i 聚合发电机的阻尼系数; 本文采用与频率相关的荷载模型来表示荷载总和,即

$$P_{li} = P_{li}^0 (1 + D_{li}(\omega_i - \omega_{nom,i})) \quad (3)$$

式中, P_{li}^0 为 P_{li} 额定频率值时的值,视为用户对电网的需求; D_{li} 为阻尼系数。

对于聚合发电机, P_{mi} 由本地的速度调节器进行调节。

$$T_{smi} \frac{dP_{mi}}{dt} = P_{mi}^0 - P_{mi} - \frac{P_{nom,i}}{\sigma_i}(\omega_i - \omega_{nom,i}) \quad (4)$$

式中, T_{smi} 为伺服电动机的时间常数; σ_i 为功率下垂系数; $P_{nom,i}$ 为额定机械功率; P_{mi}^0 为 P_{mi} 在正常频率时的值。由于本地调速器调节时间相较于换流器的控制时间长得多,因此可以把 P_{mi} 看作是一个常数。

由于本文研究的时间尺度较短,对 VSC 的高频特性和瞬态特性进行了研究,因此作出以下假设。

假设 1: VSC 可以即时跟踪功率参考信号,并且在直流电网和 AC 区域之间不需要电源,直流电网可以看作是一个纯电阻电网。根据欧姆定律,从交流区域 i 向直流电网注入的功率用 P_i^{dc} 表示,即

$$P_i^{dc} = \sum_{j=1}^n \frac{V_{dc,i}(V_i^{dc} - V_j^{dc})}{R_{ij}} \quad (5)$$

式中, V_i^{dc} 为与区域 i 连接的 VSC 直流侧电压; R_{ij} 为区域 i 与区域 j 之间直流线路的电阻,如果区域 i 与区域 j 没有电气连接,则认为 $R_{ij} = \infty$ 。

相较于 AC 区域, VSC 的动态响应时间要短得多,因此研究共享 WPP 功率裕度为 AC 区域提供频率支持时,可以将 WPP 建模为向直流电网输送电能的 AC 电源。第 i 个 WPP 区域风电功率表示为

$$P_{w,i} = N_i \frac{\rho A_i}{2} C_p(\Omega_i, W_i, \theta_i) W_i^3 \quad (6)$$

式中, N_i 为 WPP 中风力涡轮机的数量; A_i 为叶片扫掠面积; ρ 为空气密度; 功率系数 C_p 为桨距角 θ_i 、风速 W_i 和轴速 Ω_i 的函数,它们控制着风力涡轮机捕获的能量。

假设风电场采用卸载策略,根据图 2 中的曲线进行功率控制。当风速 W 达到 W_r 值时,将功率维持在比额定功率 P_{rated} 低的值 $P_{w,r}$,以便有一定的功

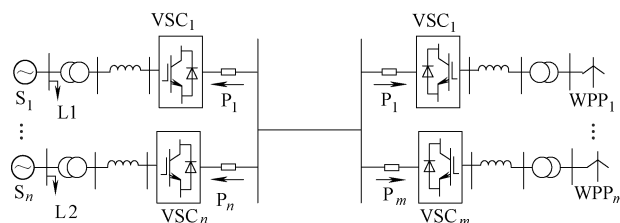


图 1 MT-HVDC 结构图

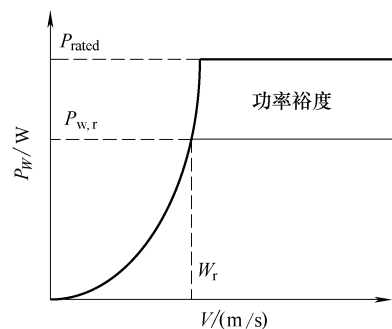


图 2 WPP 卸载功率控制策略

率裕度为 AC 区域提供快速的频率支持。

频率附加控制策略

1. 参考工作点

本文在变量上加“—”表示其在平衡点上的值,存在一些隐含条件,包括 $\bar{\omega}_i = \omega_{nom,i}$, $\bar{P}_{mi} = \bar{P}_{mi}^0$, $\bar{P}_{li} = \bar{P}_{li}^0 = \bar{P}_{mi}^0 - \bar{P}_i^{dc}$ 由于扰动导致变量在平衡点周围存在的偏差定义为 $y_i = \omega_i - \omega_{nom,i}$, $x_i = P_{mi} - P_{mi}^0$, $d_i = P_{li}^0 - \bar{P}_{li}^0$, $u_i = P_i^{dc} - \bar{P}_i^{dc}$

然后,对式(1)~式(4)进行线性化,得到

$$\begin{cases} \frac{dy_i}{dt} = -a_{1i}y_i + a_{2i}(x_i - u_i - d_i) \\ \frac{dx_i}{dt} = -a_{3i} - a_{4i}x_i \end{cases}$$

其中 $a_{1i} = \frac{Dgi + \bar{P}_{li}^0 D_{li}}{2H_i}$

$$a_{2i} = \frac{1}{2H_i}$$

$$a_{3i} = \frac{P_{nom,i}}{T_{smi} \sigma_i}$$

$$a_{4i} = \frac{1}{T_{smi}}$$

2. 自适应电压下垂控制

本文所提出的频率附加控制是基于自适应电压下垂控制的,系统在发生扰动时,附加频率控制改变了注入 AC 区域的功率 P_{dc}^i ,在电压下垂控制作用下,直流母线电压出现偏差。传统电压下垂控制中下垂系数 K_{vd} 为常数,电压偏差较大,甚至超出电压限值。基于此,本文设计一种自适应电压下垂控制,改进电压控制性能。自适应电压控制如图 3 所示,图中 K_{vd}^{adapt} 为自适应下垂系数,其与固定下垂系数的关系如下

$$k_{vd}^{adapt} = \alpha k_{vd} \quad (8)$$

其中, α 为影响因子,由下式给出

$$\alpha = \frac{\Delta V_{deref} + \Delta V_{dc}}{|\Delta V_{deref} - \Delta V_{dc}|} \quad (9)$$

式中, ΔV_{deref} 为电压裕度,本文设置为额定电压的 10%; ΔV_{dc} 为实测电压偏差量。

α 与 ΔV_{dc} 的关系如图 4 所示。

当 ΔV_{dc} 较小时, α 近似等于 1; 当 ΔV_{dc} 接近

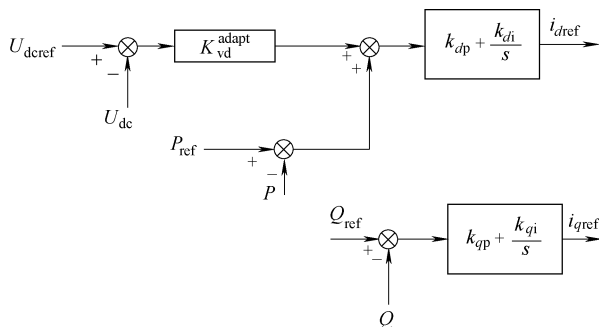


图 3 VSC 自适应电压下垂控制框图

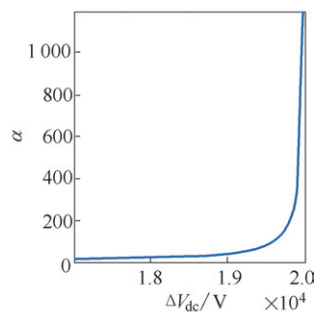


图 4 α 随 ΔV_{dc} 变化曲线

ΔV_{deref} 时, α 迅速增大,减小电压偏差,防止电压越限。

3. 分布式频率控制方案

本节提出一种分布式控制方案来共享各区域功率裕度。在 AC 区域自适应电压下垂控制的基础上增加基于一致性的双环附加频率控制。在 WPP 侧控制器中增加基于 AC 区域频率偏差的 PI 控制。

(1) AC 侧附加频率控制

基于多智能体一致性算法,提出 AC 侧 VSC 附加频率控制方案为

$$u_i = \sum_{j=1}^n l_{ij}(\alpha \int (y_i - y_j) dt + \beta(y_i - y_j)) \quad (10)$$

式中, u_i 为第 i 个 AC 区域从 MT-HVDC 中提取的有功功率参考偏差值; 其中 α 和 β 是比例积分控制增益; l_{ij} 表示区域 i 与区域 j 之间的通信情况,假设 $l_{ij} = -\lambda_i \lambda_j$, λ_j 为节点 j 的度,如果节点 i 可以与节点 j 通信,则 $l_{ij} = 1$,反之则为 0; u_i 为 WPP 区域从 MT-HVDC 系统提取的功率参考偏差。AC 侧附加频率控制如图 5a 所示。

根据实际情况,作出如下假设:

假设 2: 通信网络图是固定的、无向的、连通的,即 $L = [l_{ij}]$ 是一半正定常数矩阵。

假设 3: 控制变量不改变整个电网的潮流,即

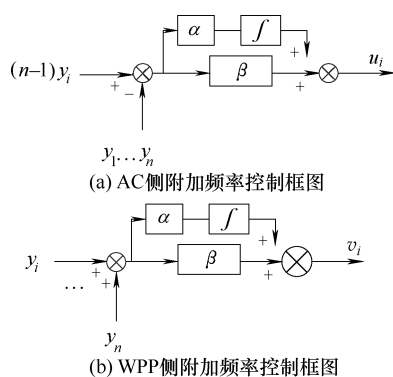


图5 附加频率控制框图

若 $\sum_{i=1}^n u_i = 0$, 则式(5)、式(6)可改写为

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} y \\ x \\ u \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} y \\ x \\ u \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} A_2 \\ 0 \\ \beta LA_2 \end{pmatrix} d \quad (11)$$

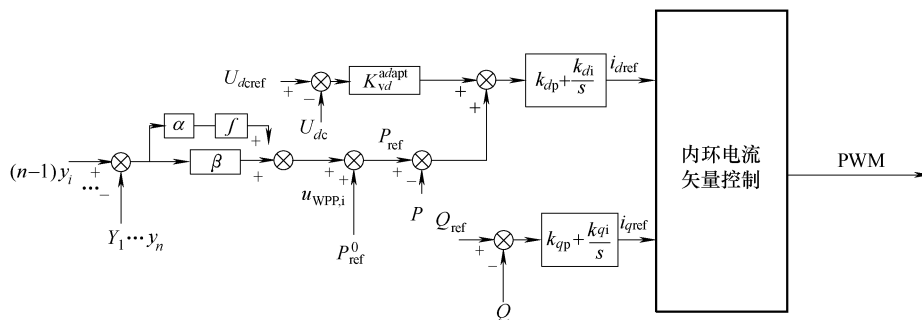


图6 AC侧VSC整体控制策略

式中, α 和 β 是比例积分控制增益; v_i 为 WPP 区域注入 MT-HVDC 系统功率参考的偏差。

WPP 侧附加频率控制如图 5b 所示, WPP 侧 VSC 控制策略其他部分与 AC 侧相似。

仿真验证

1. 仿真模型和参数

为了验证本文所提控制策略的有效性, 在 MATLAB/Simulink 中搭建了图 1 所示 4 端 HVDC 系统仿真模型, 参考舟山工程, 直流电压等级为 400 kV。在所有 VSC 中均采用自适应下垂控制, 同时在 AC 侧 VSC 中附加基于一致性的频率控制。在 WPP 侧 VSC 中采用自适应下垂控制的同时增加基于 AC 频率的 PI 控制。本文规定流入 MT-HVDC 系统的功率为正方向, 主要参数见下表。下面主要进

$$M = \begin{pmatrix} -A_1 & A_2 & -A_2 \\ -A_3 & -A_4 & 0 \\ L(\alpha I - \beta A_1) & \beta LA_2 & -\beta LA_2 \end{pmatrix},$$

$$A_i = \begin{bmatrix} a_{i1} \\ a_{i2} \\ \vdots \\ a_{iN} \end{bmatrix}, i = 1, 2, 3, 4$$

AC 侧 VSC 整体控制如图 6 所示, 内环采用电流双闭环解耦控制。

(2) WPP 侧附加频率控制

为了使 WPP 能够在 AC 区域频率发生扰动时共享功率裕度, 在 WPP 侧 VSC 增加频率附加控制如下

$$v_i = \sum_{i=1}^n (\alpha \int y_i dt + y_i \beta) \quad (12)$$

行两种工况的仿真验证: AC 区域突增负荷和 AC 区域突减负荷。

表 仿真系统主要参数

仿真参数	AC1	AC2	WPP1	WPP2
P_{mi}^0/MW	1 200	800	360	255
H_i	80	60	-	-
σ_i/s	0.02	0.02	-	-
T_{smi}/s	4	3	-	-
$D_{gi}/\text{kW} \cdot \text{s}^2$	80	60	-	-
$P_{ref}^{\text{dc}}/\text{MW}$	-300	-200	300	200
f_{acnom}/Hz	50	50	-	-
k_{vd}	0.026	0.018	0.01	0.01
α	20	20	20	20
β	5	5	5	5

2. 工况 1: 交流区域负载突增

初始时 VSC-MTDC 系统运行在标准状态下, 各

AC 区域频率 $f_{ac} = f_{acref} = 1$ pu。在 $t = 15$ s 时, AC2 区域突然接入一个 120 MW 的负荷, 由于负荷冲击, 电网频率发生扰动。在不使用频率附加控制时, AC1 和 AC2 的频率曲线如图 7 所示。AC2 由于负载突增导致频率发生较大下降, 达到 0.997 3 pu, 而且保持在较低值。AC1 区域频率基本不变, 不会对 AC2 进行频率支持。

使用本文提出的频率附加控制, 各区域与 MT-HVDC 功率交换如图 8 所示, 在 AC2 区域发生扰动后, 由于附加频率控制, AC2 区域从 MT-HVDC 中提取的功率增加 70 MW, AC1 区域从 MT-HVDC 中提取的功率减小 30 MW, WPP1、WPP2 增加注入 MT-HVDC 的功率分别为 10 MW、30 MW, 实现对 AC2 区域频率支持。AC1、AC2 区域频率曲线如图 9 所示, 由于频率一致性控制, AC2 在发生扰动后频率最低点相较于不加频率控制时高, 为 0.998 3 pu。同时 AC1 具有响应 AC2 扰动的能力。在频率一致性控制下, 最终 AC1、AC2 频率达到一致。

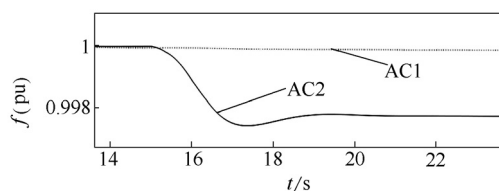


图 7 工况 1 时未加频率控制时各 AC 区域频率

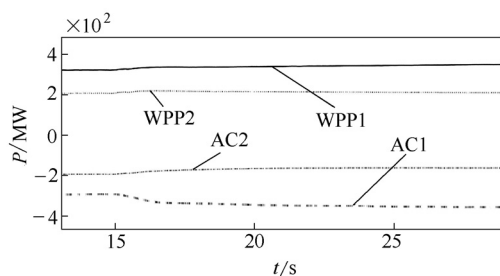


图 8 工况 1 时附加频率控制时各区域功率

工况 1 时, 不同控制策略下 MT-HVDC 系统直流电压波形如图 10 所示, 使用固定系数的电压下垂控制在 AC2 区域发生扰动后, 直流电压最低点低于 367 kV, 接近电压限值。本文提出的自适应电压下垂控制, MT-HVDC 系统直流电压偏差较小, 最

低为 3.9 kV, 可以看出, 本文所提的自适应下垂控制对直流电压性能有较大改善。

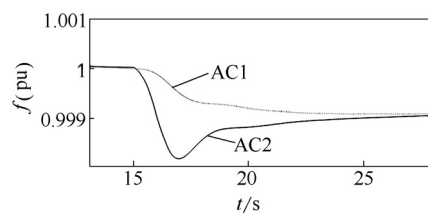


图 9 工况 1 时附加频率控制时各 AC 区域频率

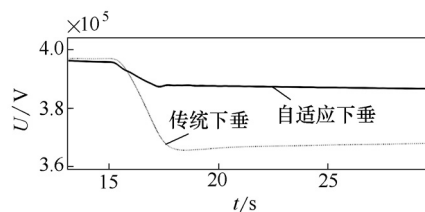


图 10 工况 1 时直流母线电压

3. 工况 2: 交流区域负载突减

系统初始运行状态与工况 1 相同, 在 $t = 15$ s 时, AC2 区域突然断开 120 MW 的负荷, 电网频率发生扰动。不使用频率附加控制时, 与工况 1 相同, 各区域不具有响应 AC2 扰动的能力, 频率曲线如图 11 所示。AC2 由于负载突然减小, 导致频率上升至 1.002 pu。AC1 区域频率基本不变, 不会对 AC2 进行频率支持。

在工况 2 时, 由于附加频率控制, AC2 区域从 MT-HVDC 中提取的功率减小, AC1 区域从 MT-HVDC 中提取的功率增加, WPP1、WPP2 减小注入 MT-HVDC 的功率, 实现对 AC2 区域频率支持。AC1、AC2 区域频率曲线如图 12 所示, 由于频率一致性控制, AC2 在发生扰动后频率最高点相较于不加频率控制时较低, 为 1.002 3 pu。同时 AC1 具有

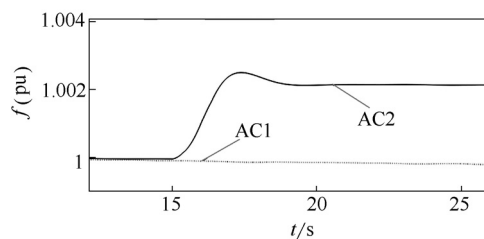


图 11 工况 2 时未加频率控制时各 AC 区域频率

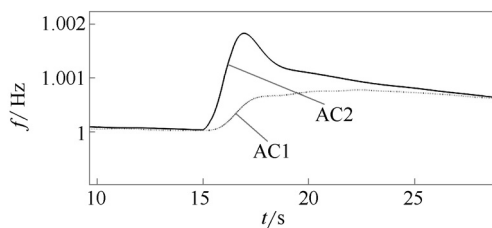


图 12 工况 2 时附加频率控制时各 AC 区域频率

响应 AC2 扰动的能力。在频率一致性控制下，最终 AC1、AC2 频率达到一致。

工况 2 时，不同控制策略下 MT-HVDC 系统直流电压波形如图 13 所示，自适应电压下垂控制在系统发生扰动后具有抑制直流电压波动的作用，电压偏差相对固定电压下垂系数控制较小。

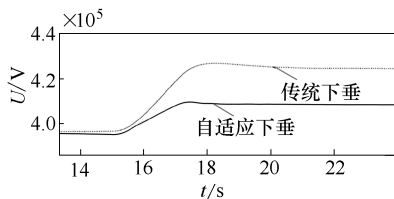


图 13 工况 2 时直流母线电压

结束语

针对具有风电并网的 VSC-MTDC 系统，本文提出了基于自适应电压下垂控制的频率附加控制策略，在传统电压下垂系数中增加与电压限值有关的影响因子，使得在系统发生扰动后，MT-HVDC 直流电压波动较小、偏差较小，防止电压越限。同时，本文分别在 AC 侧 VSC 中增加基于一致性算法的附加频率控制策略，在 WPP 侧 VSC 中增加基于 AC 频率偏差的 PI 控制，各区域通过共享功率裕度实现对 AC 频率支持，同时使各 AC 区域频率最终达到一致。在 MATLAB/Simulink 仿真平台搭建 4 端 HVDC 输电系统，验证了 AC2 区域负载突增和负载突减两个工况下控制策略的有效性。EA

(收稿日期：2021.02.03)

(上接 72 页)

表 10 主站接收断路器 5062 和 5063 分位报文

2020-06-29 10:43:11 [接收报文] 类型标识: 03 双点遥信 (遥信) 68 13 12 00 04 00 03 02 03 00 01 00 01 13 00 01 18 00 00 01

极 1 高端阀组收到保护跳闸 ESOF 信号，该阀组 Blocked 状态显示合位，Deblocked 状态显示分位，事故总随之产生。主站接收到 RCI 转发报文见表 11。

表 11 主站接收阀组 Deblocked 和 Blocked 状态报文及其事故总 SOE

2020-06-29 10:43:11 [接收报文] 类型标识: 01 单点遥信 (遥信) 68 18 0a 00 00 02 01 03 03 00 01 00 01 00 00 01 02 00 00 06 00 00 01

2020-06-29 10:43:11 [接收报文] 类型标识: 30 带时标单点遥信 (SOE) 68 15 8a 02 02 00 1e 01 03 00 01 00 01 00 00 01 60 26 2b 0a 1d 06 14

结束语

本文结合±800 kV 某特高压直流输电工程一起阀冷系统 Trip 引起的换流站四阀组 ESOF 后，RCI 转发南网总调部分数据异常，对调度中心监盘产生了极大影响，对南方电网整个电网架构稳定运行形成一定挑战，针对上述现象进行了详细分析，并提出了整改优化方案，通过在某特高压直流输电工程仿真平台的多次试验后，将整改优化方案在换流站进行了现场实施，经过现场半年以来的运行现状观察，本次技术处理更大程度提高了自动化系统的稳定性和可靠性，对进一步提高电网安全运行水平具有重要意义，对特高压直流输电工程远动通信系统的设计和研究具有一定指导意义。EA

(收稿日期：2021.03.08)