

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2023.11.004

互联电网安全稳定控制系统可靠性评估

李生虎¹, 张楠¹, 颜云松², 韩伟³, 任建锋², 宋闯³

(1. 合肥工业大学 电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 南瑞集团有限公司(国网电力科学研究院有限公司), 江苏 南京 211106; 3. 国网河南省电力公司 电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:文章基于互联电网安全稳定控制系统(security and stability control system,SSCS)分层结构和有向指令传输,建立概率加权有向图模型;由于该模型不具有布尔特性,基于路径搜索算法,提出概率加权全连通矩阵;从维护有功平衡能力角度,提出SSCS功能可靠性指标。为提高SSCS可靠性,提出功能可靠性指标对直流线路可靠性参数的灵敏度模型。研究表明:上层控制站点和连接通道较多的控制站点对SSCS可靠性影响较大;提高系统结构的可靠性、增加可调节容量,有助于改善功能可靠性和提高大型跨区电网频率稳定水平。

关键词:安全稳定控制系统(SSCS);可靠性;灵敏度;全连通矩阵;概率加权有向图

中图分类号:TM712.3 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2023)11-1460-07

Reliability evaluation of security and stability control system in interconnected power grid

LI Shenghu¹, ZHANG Nan¹, YAN Yunsong², HAN Wei³, REN Jianfeng², SONG Chuang³
(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China; 3. Electric Power Research Institute, State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract:Based on the hierarchical structure of interconnected power grid security and stability control system(SSCS) and directed instruction transmission, a probability weighted directed graph model is established. Since the model does not have Boolean characteristics, a probability weighted fully connected matrix is proposed based on the path search algorithm. From the view of maintaining active power balance ability, the functional reliability index of SSCS is proposed. In order to improve the reliability of SSCS, the sensitivity model of functional reliability index to DC line reliability parameters is proposed. The results show that the upper control stations and the control stations with more connecting channels have a greater impact on the reliability of SSCS. Improving the reliability of the system structure and increasing the adjustable capacity is helpful to improve the functional reliability and the frequency stability level of large cross-regional power grid.

Key words: security and stability control system(SSCS); reliability; sensitivity; fully connected matrix; probability weighted directed graph

电网互联是提高能源使用效率的重要方法,也是当前电网发展的主要趋势。以华东电网为

例,当发生直流闭锁时,西北、西南和华中电网进行跨区功率支援,可能发生频率失稳的问题。

收稿日期:2021-12-28;修回日期:2022-02-25

基金项目:国家电网公司总部科技资助项目(52170221000U)

作者简介:李生虎(1974—),男,安徽合肥人,博士,合肥工业大学教授,博士生导师;

韩伟(1975—),男,河南郑州人,国网河南省电力公司教授级高级工程师。

同时由于高压直流、柔性交流、风电、光伏等增加,电网稳定控制需求增加,直流闭锁引发有功失衡和频率失稳问题尤为突出^[1-3]。安全稳定控制系统(security and stability control system,SSCS)由广域范围内设备故障事件触发,其动作早于低频减载,有助于维持电网频率和功角稳定^[4-5]。在SSCS上游设备故障导致下游设备不可用时,电网频率安全受到严重威胁,有必要加强对其可靠性研究。

现有可靠性评估算法均可用于SSCS可靠性评估,如蒙特卡洛抽样^[6-9]、故障树分析^[10-12]、状态空间法^[13-15]等。文献[6]采用基本可靠性分析方法计算SSCS装置的可靠性;文献[10]以装置底层模块为基本单位评估SSCS结构失效概率,而未涉及功能可靠性研究。当站点/通道较多、存在备用站点时,上述方法建模存在难度。

图论方法在网络重构^[16]、电网规划、故障诊断^[17]等领域已有应用。文献[18]基于有向图连通性,分析设备或网络可靠性;文献[19]判断源荷间连通性,计算变电站风险指标,其中可达矩阵由邻接矩阵进行布尔运算得到;文献[20]给出电气接线任意节点间连通路经算法,其接线相对SSCS结构简单。SSCS加权图具有概率属性,布尔运算不适用^[21]。

上述研究均针对SSCS结构失效风险,而SSCS控制目的是在电网突然产生大量功率缺额

后,快速提升功率、维持有功平衡。考虑站点控制备用和控制路径的多样性,即使有部分站点或通道故障,也未必一定导致功率缺额。因此需从SSCS设计目的考虑,研究电网发生功率缺额后SSCS能够弥补电功率缺额的能力,现有文献均未考虑该问题。

可靠性灵敏度可以量化对系统可靠性影响较大的因素^[22-23]。文献[24]提出特高压直流(ultra-high voltage direct current,UHVDC)可靠性指标对元件可靠性灵敏度解析表达。SSCS可靠性指标需经多步处理得到,不是底层参数/概率的显式表达,不易直接求导。连续修改参数方法计算量大^[25]、效率低。多元函数复合求导方法可以降低计算量^[26],用于SSCS灵敏度分析。

本文考虑分层结构和有向指令传输,建立SSCS概率加权有向图模型。该模型不具有布尔特性,在得到邻接矩阵后,采用路径搜索算法提出概率加权全连通矩阵,改进SSCS可靠性指标定义,提出功能可靠性指标。建立SSCS可靠性指标对直流控制参数的灵敏度模型,以降低SSCS失效风险。

1 SSCS 的概率加权有向图模型

1.1 三层级 SSCS 结构

实际SSCS由2~7层站点组成,华中电网SSCS结构如图1所示。

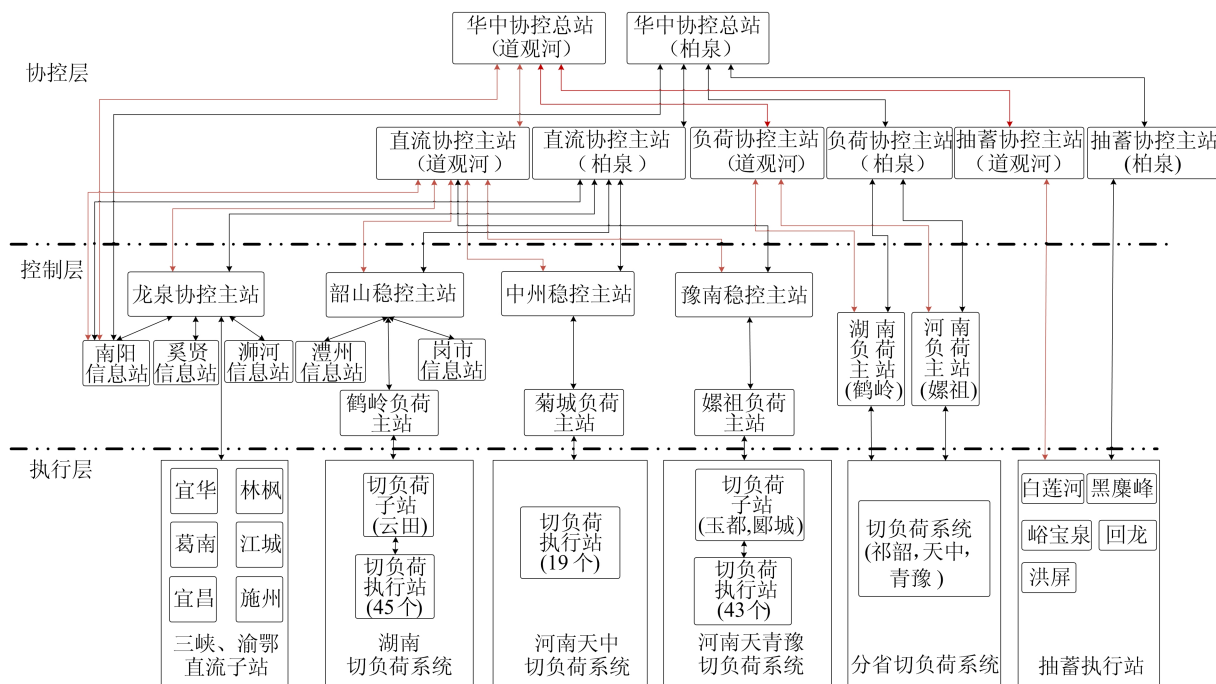


图 1 华中电网 SSCS 结构

SSCS 结构主要包括协控总站(master station, MS)、控制主站(main station, MN)和执行站(executive station, EX),如图 2 所示。图 2 中: $v_1 \sim v_4$ 为协控总站; $v_5 \sim v_{16}$ 为控制主站; $v_{17} \sim v_{34}$ 为执行站; $e_1 \sim e_{50}$ 为通信通道。 v_1 传送指令至 v_5, v_9, v_{13}, v_5 传送指令至 v_{17}, v_{19}, v_{21} , 其余站点指令传送类似分析。 v_3, v_4 分别为协控总站 v_1, v_2 的异地备用,可防止工作 MS 失效,主站和备用站间存在信息交互。在电网互联背景下,执行站分别来自不同电网,当电网 A 发生功率缺额时,利用 SSCS 向电网 B、C 发送指令实现功率调节,弥补电网 A 功率缺额。执行站包括快速响应机组、UHVDC 调制、切负荷,其中快速响应发电机组包括抽蓄及储能等。

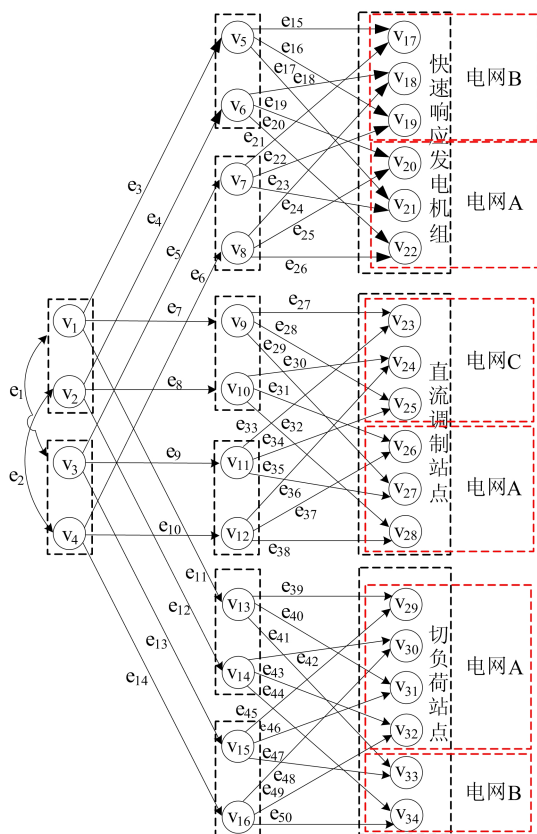


图 2 三层级 SSCS

1.2 改进的概率加权有向图

1.2.1 SSCS 站点可靠性模型

SSCS 站点可靠性模型划分为装置、单元、子单元、模块 4 个层级。SSCS 站点由 2 个互为备用稳控装置组成,稳控装置由主控单元、I/O 单元、通信单元组成^[11]。以此类推,可建立上下层级间的故障树模型,其中装置至站点故障树模型如图 3 所示。

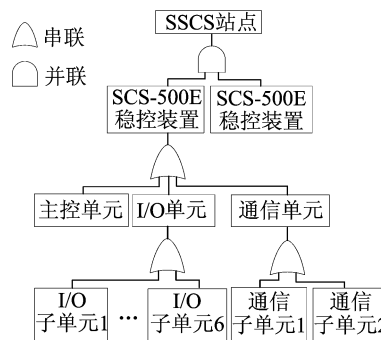


图 3 SSCS 站点故障树模型

1.2.2 概率加权邻接矩阵

考虑 SSCS 结构,将其抽象为图 $G=(V, E)$,如图 4 所示。节点集 $V=\{v_i\}$ 表示站点,边集 $E=\{e_{ij}\}$ 表示通道, e_{13}, e_{14} 表示协控总站的相互备用关系。 E 与 V 间关系由站点与通道连接与否、指令传输方向确定。考虑指令传输具有方向性, G 为有向图。

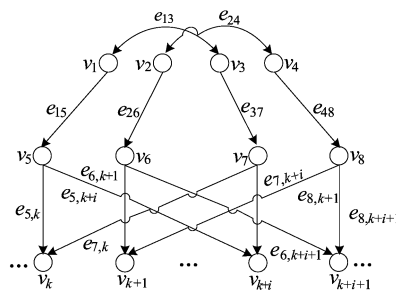


图 4 SSCS 等效拓扑

若边有权值 ω_{ij} ,则 G 为加权有向图。从可靠性评估出发,本文取 ω_{ij} 为边 e_{ij} 的可用率 $a_{e_{ij}}$,定义 G 为概率加权有向图(probabilistic weighted directed graph, PWDG)。

将图论应用于电网可靠性评估领域中时,现有文献常常仅考虑边,而忽略顶点^[18],这导致结果乐观。基于 PWDG,定义概率加权邻接矩阵为 D_{adj} ,且有:

$$D_{adj}(i, j) = a_{v_i} a_{e_{ij}} a_{v_j}, \quad i \neq j \text{ 且 } e_{ij} \in E \quad (1)$$

其中, $a_{v_i}, a_{e_{ij}}$ 分别为 v_i, e_{ij} 的可用率。相比传统邻接矩阵, D_{adj} 不仅反映了站点间连通性,还反映了站点、通道的随机故障。装置随机故障是其固有属性,可基于长期历史数据统计,受电网运行状态影响较小。

1.3 概率加权全连通矩阵建模

对于分层结构 SSCS,指令从 MS 传送至 EX 时,经过中间站点。 D_{adj} 仅能描述相邻节点间连通概率,不能反映任意两节点间连通情况。基于

D_{adj} ,运用全矩阵自乘法、行扫描法、行累加法、改进行累加法,可得到全连通矩阵,但这些算法均基于布尔运算,不适用于 SSCS。

以下提出概率加权全连通矩阵 D_{ful} 。根据拓扑搜索得到 v_i 到 v_j 的路径。定义 D_{ful} 中元素 $D_{ful}(i,j)$ 为从站点 v_i 到 v_j 的所有路径连通概率的加权和,即

$$D_{ful}(i,j) = \sum_{h=1}^{n_{i,j}} \alpha_h \frac{D_{adj}(i,b) \cdots D_{adj}(c,j)}{\prod_{l=b}^c a_{v_l}} \quad (2)$$

其中: α_h 为站点 v_i 到 v_j 的第 h 条路径的权重系数; b,c 分别为站点 v_i 到 v_j 的第 h 条路径上的第 2 个和倒数第 2 个站点序号。

$D_{ful}(i,j)$ 由如下 2 个因素决定:

- 1) 站点 v_i 到 v_j 的路径数 $n_{i,j}$ 。
- 2) 每条路径上的站点和通道数。

从 v_i 到 v_j 可能存在不止一条路径。为量化第 h 条路径对 SSCS 的影响,定义系数 α_h 为:

$$\alpha_h = \frac{n_{h,MS} S_{MS} + n_{h,MN} S_{MN} + n_{h,EX} S_{EX}}{\sum_{h=1}^{n_{i,j}} (n_{h,MS} S_{MS} + n_{h,MN} S_{MN} + n_{h,EX} S_{EX})} \quad (3)$$

其中: $n_{h,MS}$ 、 $n_{h,MN}$ 、 $n_{h,EX}$ 分别为路径 h 上协控总站、控制主站、控制子站数量; S_{MS} 、 S_{MN} 、 S_{EX} 分别为各控制层级重要度,通常取 $S_{MS} \geq S_{MN} \geq S_{EX}$ 。 α_h 保证了 $D_{ful}(i,j)$ 不大于 1,便于将 D_{ful} 用于 SSCS 可靠性评估。

2 基于 PWDG 的 SSCS 功能可靠性评估

2.1 路径可用率

评估 SSCS 功能可靠性,关键在于评估 EX 成功执行相应稳控指令的能力,因此需要量化 EX 接收 MS 传送下来指令的概率。以下给出由 MS_{v_i} 到 EX_{v_j} 路径的可用率:

$$A^{path}(i,j) = D_{ful}(i,j), \quad ID(i) = 1, ID(j) = 3 \quad (4)$$

其中: $A^{path}(i,j)$ 为 A^{path} 中的元素, A^{path} 为 $n_1 \times n_3$ 矩阵, n_1 和 n_3 分别为 MS 和 EX 的数量;ID 用于标记站点所处层级。当站点位于 MS 层级时, $ID=1$;当站点位于 MN 层级时, $ID=2$;当站点位于 EX 层级时, $ID=3$ 。

为更直观地表示 A^{path} 的含义,给出 D_{ful} 和 A^{path} 间的关系,如图 5 所示。

图 5 中,MS→MN 表示通信指令由 MS 传送至 MN,其余部分类似定义。

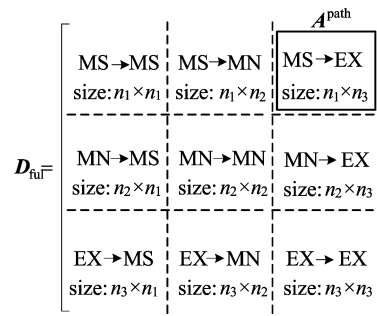


图 5 D_{ful} 和 A^{path} 间的关系

2.2 电网功率缺额

当电网发生严重故障后,有功平衡遭到破坏,可能导致频率失稳。判断能否维持频率稳定时,需要先确定当前电网功率缺额 P_{lost} 。实际导致 P_{lost} 原因很多,以下以 UHVDC 闭锁故障为例进行分析。

初始运行方式下,UHVDC 处于双极运行状态,当 UHVDC 元件随机故障时,如换流阀(CV)、换流变(CT)、控制保护设备(CP)、平波电抗器(smR)、交流滤波器(ACF)、直流滤波器(DCF)、直流线路(DCL)等,会造成功率缺额,由状态空间法可得 6 状态可靠性模型,如图 6 所示^[24]。图 6 中, λ_{ij} 、 μ_{ij} 分别为从状态 i 至 j 的等效故障率和修复率。状态 $s_1 \sim s_6$ 定义见表 1 所列。定义 P_{lost} 和 p_{lost} 为电网功率缺额及其发生概率,即

$$P_{lost} = P_{s_1} - P_{s_i}, \quad i = 2, \dots, 6 \quad (5)$$

$$p_{lost} = p_{s_i} \quad (6)$$

其中, P_{s_i} 、 p_{s_i} 分别为 UHVDC 为 s_i 状态时的载容量和概率。

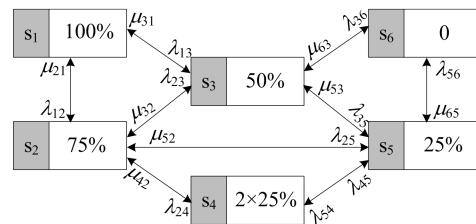


图 6 UHVDC 输电线路状态空间

表 1 UHVDC 运行状态

状态	可用容量/%	运行方式
s_1	100	双极运行
s_2	75	单极+1/2 极运行
s_3	50	单极运行
s_4	2×25	2 个 1/2 极运行
s_5	25	1/2 极运行
s_6	0	双极停运

2.3 功能可靠性指标计算

定义 Ω 为 SSCS 状态集合, 实际状态 x 由控制站点、通道、UHVDC 运行故障确定, x 维数为上述设备状态组合数。由于装置和路径较多, 状态空间庞大, 以下检验 $N-1$ 故障。 $N-1$ 故障表示一个站点或一个通信通道发生故障的情况。区分如下 2 种情况: ① SSCS 正常运行时, $p_x = p_{\text{lost}}$; ② SSCS 发生 $N-1$ 故障时, 定义状态概率 p_x :

$$p_x = \begin{cases} p_{\text{lost}}(1 - p_{e_k}), & e_k \text{ 故障;} \\ p_{\text{lost}}(1 - p_{v_k}), & v_k \text{ 故障} \end{cases} \quad (7)$$

为准确评估 SSCS 填补功率缺额的能力, 定义失效风险 R_{CR} 和失效功率 P_{CR} 2 个功能可靠性指标, 即

$$R_{\text{CR}} = \sum_{x \in \Omega} \eta_x p_x \quad (8)$$

$$P_{\text{CR}} = \sum_{x \in \Omega} \eta_x p_x \Delta P_x,$$

$$\Delta P_x = P_{\text{lost}} - \sum_{i=1}^{n_3} P_{v_i} \left[1 - \prod_{j=1}^{n_1} (1 - A_x^{\text{path}}(j, i)) \right] \quad (9)$$

其中: η_x 为测试函数; ΔP_x 为 EX 执行稳控措施后的功率缺额; P_{v_i} 为 EX v_i 可调容量; $A_x^{\text{path}}(j, i)$ 为系统状态为 x 时由 MS v_j 到 EX v_i 路径连通的概率。

当 $\Delta P_x < 0$ 时, SSCS 中所有 EX 的可调容量足以填补电网功率缺额, $\eta_x = 0$, x 不统计入 R_{CR} 和 P_{CR} 中; 当 $\Delta P_x > 0$ 时, SSCS 中所有 EX 的可调容量不足以填补电网功率缺额, $\eta_x = 1$, x 需要计入 R_{CR} 和 P_{CR} 中。

3 SSCS 可靠性灵敏度分析

3.1 可靠性指标对 SSCS 装置可用率的灵敏度

SSCS 控制能力由其装置可调容量和可用率决定。前者通常在工程建设初期便已确定, 因此以下研究后者对 SSCS 可靠性的影响。功能可靠性灵敏度用于寻找对 SSCS 功率平衡能力影响较大的元件和参数。

SSCS 装置参数影响系统路径可用率 A^{path} 。对系统状态 x , ΔP_x 是系统处于状态 x 时 A^{path} 的函数, 受 SSCS 装置可用率的影响。以 a_{v_k} 为例, 求 P_{CR} 对 a_{v_k} 的灵敏度, 即

$$\frac{\partial P_{\text{CR}}}{\partial a_{v_k}} = \sum_{x \in \Omega} \eta_x p_x \frac{\partial \Delta P_x}{\partial a_{v_k}} = \sum_{x \in \Omega} \eta_x p_x \frac{\partial \left[\sum_{i=1}^{n_3} P_{v_i} \prod_{j=1}^{n_1} (1 - A_x^{\text{path}}(j, i)) \right]}{\partial a_{v_k}} =$$

$$- \sum_{x \in \Omega} \eta_x p_x \left\{ \sum_{i=1}^{n_3} P_{v_i} \left[\frac{\partial A_x^{\text{path}}(j, i)}{\partial a_{v_k}} \times \prod_{\substack{l=1 \\ l \neq j}}^{n_1} (1 - A_x^{\text{path}}(l, i)) \right] \right\} \quad (10)$$

其中: η_x 由 ΔP_x 正负决定, 取值为 0 或 1; p_x 随功率缺额概率而改变, 若 SSCS 处于 $N-1$ 故障, p_x 受 SSCS 故障装置参数影响, 则与其他站点和通道无关。因此只有 ΔP_x 是 SSCS 装置可用率的函数, 且只存在于功能可靠性指标 P_{CR} 中。

3.2 可靠性指标对 UHVDC 元件参数的灵敏度

功能可靠性指标 R_{CR} 和 P_{CR} 体现功率缺额及其发生概率。为量化 UHVDC 元件故障对 SSCS 影响, 建立可靠性指标对 UHVDC 元件参数的灵敏度解析模型。故障发生概率 p_{lost} 与 UHVDC 中直流线路可靠性参数 z_{DC} 有关。UHVDC 和 SSCS 结构相互独立, p_x 对 z_{DC} 求偏导, 即

$$\frac{\partial p_x}{\partial z_{\text{DC}}} = (1 - p_{v_k}) \frac{\partial p_{\text{lost}}}{\partial z_{\text{DC}}} = (1 - p_{v_k}) \frac{\partial p_i}{\partial z_{\text{DC}}} = (1 - p_{v_k}) \left[-\mathbf{D}_s^{-1} \frac{\partial \mathbf{D}_s}{\partial z_{\text{DC}}} \mathbf{D}_s^{-1} \mathbf{B} \right]_{1,i} \quad (11)$$

其中: z_{DC} 为直流线路故障率 λ_{DC} 或修复率 μ_{DC} ; $[\]_{1,i}$ 为矩阵第 1 行第 i 列元素; \mathbf{D}_s 为 \mathbf{T}_s 最后一行元素替换为 1 得到的矩阵; $\mathbf{B} = [0 \cdots 0 \ 1]^T$; \mathbf{T}_s 和 \mathbf{T}_s' 分别为等值前、后的转移率矩阵, 且有:

$$\frac{\partial \mathbf{T}_s'}{\partial z_{\text{DC}}} = -\mathbf{p}_{\text{IE}}^{-1} \frac{\partial \mathbf{p}_{\text{IE}}}{\partial z_{\text{DC}}} \mathbf{p}_{\text{IE}}^{-1} \mathbf{M} \mathbf{T}_s \mathbf{M}^T + \mathbf{p}_{\text{IE}}^{-1} \mathbf{M} \left(\frac{\partial \mathbf{p}_{\text{IE}}}{\partial z_{\text{DC}}} \mathbf{T}_s + \mathbf{p}_{\text{IE}} \frac{\partial \mathbf{T}_s}{\partial z_{\text{DC}}} \right) \mathbf{M}^T \quad (12)$$

其中: 常数阵 $\mathbf{M} = [m_1 \ m_2 \ \cdots \ m_h]^T$ 表示合并特征。当等值前状态归属于等值后状态 i 时, m_i 中对应元素为 1, 其余元素为 0; \mathbf{p}_{IE} 和 \mathbf{p}_{IE} 分别表示等值前、后状态概率对角阵, $\mathbf{p}_{\text{IE}} = \mathbf{M} \mathbf{p}_{\text{IE}} \mathbf{M}^T$ 。

SSCS 功能可靠性指标 R_{CR} 、 P_{CR} 是关于系统状态概率 p_x 的复合函数, 联立式(8)、式(9), R_{CR} 、 P_{CR} 对 z_{DC} 的灵敏度如下:

$$\frac{\partial R_{\text{CR}}}{\partial z_{\text{DC}}} = \sum_{x \in \Omega} \eta_x \frac{\partial p_x}{\partial z_{\text{DC}}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial P_{\text{CR}}}{\partial z_{\text{DC}}} = \sum_{x \in \Omega} \eta_x \Delta P_x \frac{\partial p_x}{\partial z_{\text{DC}}} \quad (14)$$

如果调整稳控站点和通信通道可用率后, SSCS 功率缺额风险仍较大, 那么可通过改善 UHVDC 参数、配置备用元件等降低电网频率失稳风险。

4 算例分析

互联网 SSCS 站点控制容量分别来自电网

A、B、C,其中包括 34 个站点和 50 条通道(图 2)。SSCS 站点和通信线路可靠性参数参考文献[11],UHVDC 元件可靠性参数参考文献[23]。

4.1 SSSCS 功能可靠性评估

在正常运行和 $N-1$ 方式下计算 R_{CR} 、 P_{CR} ,结果如图 7 所示。图 7 中,运行方式 1~6 的功率缺额量分别为 0、25%、50%、75%、100%。当 UHVDC 单极运行时, R_{CR} 、 P_{CR} 占比明显高于其他状况,状态 s_3 概率比 $s_4 \sim s_6$ 概率大 2~3 个数量级。当 UHVDC 双极运行时,功率缺额量为 0。当 UHVDC 处于 3/4 双极运行时,SSCS 正常运行下 R_{CR} 、 P_{CR} 为 0,说明控制子站可调容量之和能够填补功率缺额,系统不存在功率缺额风险。相较于处于 1/2 双极运行状态 s_4 和双极停运状态 s_6 ,处于 1/2 单极运行状态 s_5 时,系统失效功率较大,需要增加可调容量。

因此 R_{CR} 和 P_{CR} 主要受电网功率缺额量和稳控系统可调容量 2 个因素影响,前者决定 R_{CR} 、 P_{CR} 占比,后者影响 R_{CR} 、 P_{CR} 具体数值。

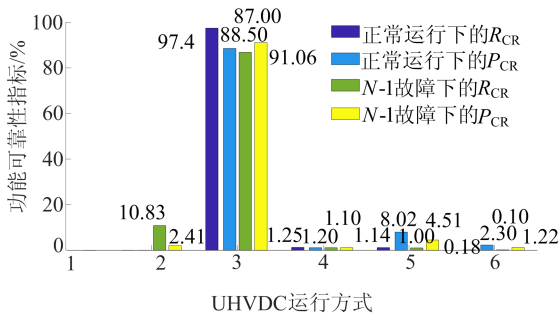
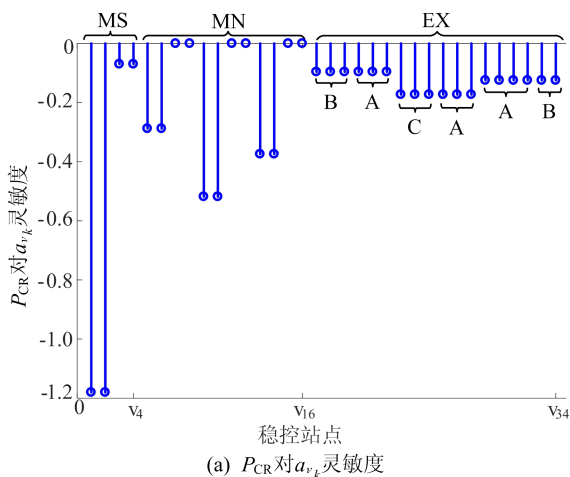


图 7 不同功率缺额情况下的 R_{CR} 和 P_{CR}

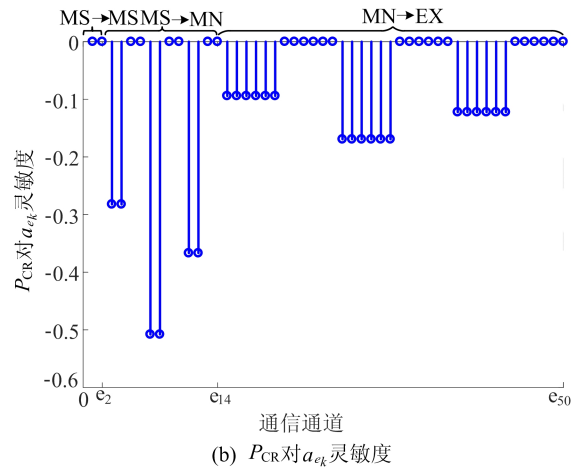
4.2 SSSCS 功能可靠性灵敏度分析

4.2.1 P_{CR} 对 SSSCS 装置可用率灵敏度

以 SSSCS 正常运行情况为例进行分析,可计算 P_{CR} 对 SSSCS 装置可用率的灵敏度,结果如图 8 所示。



(a) P_{CR} 对 a_k 灵敏度



(b) P_{CR} 对 a_k 灵敏度

图 8 P_{CR} 对 SSSCS 装置可用率的灵敏度

图 8 中, A、B、C 表示站点分别来自电网 A、电网 B 和电网 C。

从站点来看,协控总站对 P_{CR} 影响最大,其次为控制主站、控制子站。说明站层级越高,对系统可靠性影响越大;与越高层级站点相连的通道,对系统可靠性影响越大。

备用协控总站投入前提是原协控总站故障,该事件发生概率极低。因此相对原协控总站,备用协控总站可靠性变化对系统功能可靠性影响不大。

4.2.2 R_{CR} 、 P_{CR} 对 UHVDC 元件可靠性灵敏度

R_{CR} 、 P_{CR} 对 UHVDC 元件可靠性参数的灵敏度如图 9 所示。

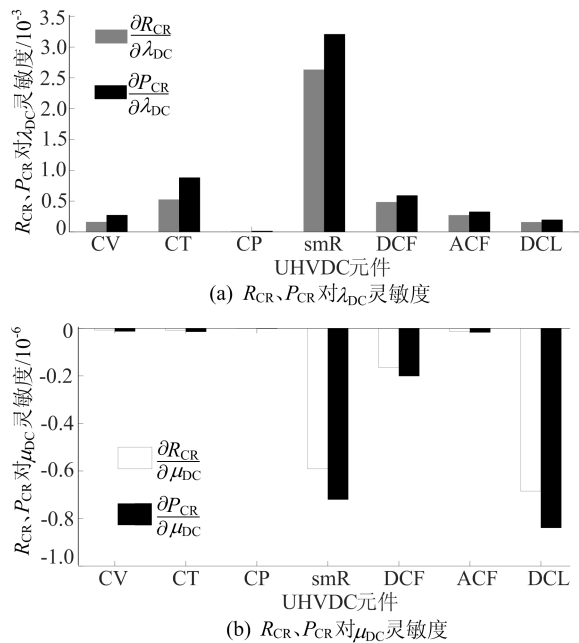


图 9 SSSCS 功能可靠性指标对 UHVDC 元件参数灵敏度

R_{CR} 对故障率和修复率灵敏度较大,说明 UHVDC 元件可靠性参数变化更易影响 R_{CR} 。与

其他 UHVDC 元件相比, smR 故障率和修复率变化对 SSCS 功能可靠性影响较大; R_{CR} 、 P_{CR} 对 DCL 修复率灵敏度很大。当电网中因 UHVDC 故障而发生功率缺额时, 可以考虑修正 smR 故障和修复率及 DCL 修复率改善 SSCS 功能可靠性。

5 结 论

本文研究了频率安全的互联电网安全稳定控制系统可靠性模型及灵敏度算法, 得到以下结论:

1) SSCS 功能可靠性主要受电网功率缺额和 SSCS 可调容量影响。降低电网功率缺额风险、增加 SSCS 站点可调节容量, 有助于改善 SSCS 功能可靠性。相较于正常运行, SSCS 在发生 $N-1$ 故障情况下无法填补电网功率缺额的可能性更大。

2) 当电网中因 UHVDC 故障降额运行而导致电网出现功率缺额时, 需要 SSCS 控制其他线路增发功率或切除负荷以弥补 UHVDC 带来的功率缺额; 当 UHVDC 作为安全稳定控制的可控对象时, UHVDC 内部元件中, 平波电抗器和直流线路可靠性对 SSCS 可靠性影响较大。

参 考 文 献

- [1] 王莹, 刘兵, 刘天斌, 等. 特高压直流闭锁后省间紧急功率支援的协调优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(11): 2695-2702.
- [2] 许涛, 吴雪莲, 李兆伟, 等. 改善系统频率稳定性的多直流功率紧急支援协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 69-77, 143.
- [3] 李兆伟, 方勇杰, 黄慧, 等. 系统保护中跨区直流频率调制与紧急功率支援的协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 31-36.
- [4] SHU Y, TANG Y. Analysis and recommendations for the adaptability of China's power system security and stability relevant standards[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2017, 3(4): 334-339.
- [5] YU W, XUE Y, LUO J, et al. An UHV grid security and stability defense system: considering the risk of power system communication[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(1): 491-500.
- [6] 彭云豪, 董希建, 周海强, 等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 123-131.
- [7] 秦砺寒, 陈丹, 李顺昕, 等. 面向配电网可靠性评估的输电网等值方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(22): 71-76.
- [8] PENG L, HU B, XIE K, et al. Analytical model for fast reliability evaluation of composite generation and transmission system based on sequential Monte Carlo simulation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 109: 548-557.
- [9] 葛少云, 张鑫, 刘洪, 等. 基于点估计法的有源配电网概率可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 91-100.
- [10] YAN Y, SUN N, ZHANG N, et al. Hierarchical reliability evaluation to security and stability control system of power systems[C]//2020 5th Asia Conference on Power and Electrical Engineering (ACPEE). [S. l.]: IEEE, 2020: 366-370.
- [11] 颜云松, 孙宁, 张楠, 等. 基于预防检修周期优化的电网稳定控制系统失效风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(17): 139-146.
- [12] GJORGEV B, ANTENUCCI A, VOLKANOVSKI A, et al. An FTA method for the unavailability of supply in gas networks supported by physical models[J]. IEEE Transactions on Reliability, 2020, 69(2): 740-753.
- [13] HUA Y, LI S, WU Z. Reliability modeling of AC filter in UHVDC link based on reactive power compensation and harmonic performance evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(5): 1978-1987.
- [14] CONG Z, LIU Y, FANG J, et al. Root-cause identification of single line-to-ground fault in urban small current grounding systems based on correlation dimension and average resistance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 35(4): 1834-1843.
- [15] 叶远波, 刘宏君, 黄太贵, 等. 变电站继电保护设备状态检修可靠性分析方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 170-177.
- [16] ZHANG Y, ZHU S. Reliability modeling and control schemes of composite energy storage and wind generation system with adequate transmission upgrades [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2011, 2(4): 520-526.
- [17] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 计及拓扑结构的时间 Petri 网故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2723-2735.
- [18] SU H, ZIO E, ZHANG J, et al. A systematic framework of vulnerability analysis of a natural gas pipeline network[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2018, 17(5): 79-91.
- [19] 张忠会, 谢义苗, 王卉. 图论在变电站风险评估中的应用[J]. 电测与仪表, 2015, 52(3): 112-116.
- [20] 王增平, 张晋芳, 张亚刚. 基于主接线图形特征的厂站内拓扑分析新方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 255-260.
- [21] 樊林波, 杨小兰. 一种基于有向图的复杂系统可靠度计算方法[J]. 遵义师范学院学报, 2012, 14(4): 87-90, 71.
- [22] WANG B, WANG X, BIE Z, et al. Reliability model of MMC considering periodic preventive maintenance[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 33(3): 1535-1544.
- [23] LI S, MA Y, HUA Y, et al. Reliability equivalence and sensitivity analysis to UHVDC system based on matrix description of F&D method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 456-464.
- [24] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-30, 53.
- [25] 谢开贵, 马怀冬, 胡博, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 71-78.
- [26] 任震, 梁振升, 黄雯莹. 交直流混合输电系统可靠性指标的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2004, 28(14): 33-36, 40.

(责任编辑 张 镛)