

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.004

## 扁平化安全稳定控制系统薄弱环节辨识

李生虎<sup>1</sup>, 周慧敏<sup>1</sup>, 颜云松<sup>2</sup>, 韩伟<sup>3</sup>, 任建锋<sup>2</sup>, 宋闯<sup>3</sup>

(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(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:**安全稳定控制系统(SSCS)扁平化设计可实现各控制子站间、各分区电网间的信息交互,有利于减小SSCS层数,提高可靠性,但是增加了控制路径搜索和薄弱环节辨识的难度。文中在树状SSCS中增加双向/环状通道以减少中间站点,根据邻接矩阵搜索从顶层站点到底层站点的所有路径;计及元件可用率和底层站点可控容量,量化扁平化SSCS对底层资源的控制能力;定义站点平均控制能力和平均关联路径数指标,评价扁平化对各站点控制能力的影响;提出扁平化SSCS控制能力对元件可用度的灵敏度的解析算法,以确定SSCS薄弱环节。算例表明:扁平化设计减少了层级和中间站点,同时提高了SSCS控制能力;站点所经路径越多、层数越少、路径可控容量越大,对SSCS控制能力影响越大。

**关键词:**安全稳定控制系统(SSCS);扁平化设计;控制能力;薄弱环节;灵敏度模型;互联电网

**中图分类号:**TM73;TM712

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)03-0032-07

### 0 引言

安全稳定控制系统(security and stability control system, SSCS)由通信通道和控制站点组成,主要用于维护电网频率和功角稳定<sup>[1-4]</sup>。通信通道一般采用光纤通信,长度可达几十、几百甚至上千公里;控制站点包括多层站点,其中底层站点连接不同类型的控制资源,如水电<sup>[5]</sup>、抽蓄、可切负荷<sup>[6]</sup>、储能、高压直流换流站等<sup>[7]</sup>,通过切泵、减载、直流调制等维持电网有功平衡。

SSCS可基于动态数据参数,也可由严重事件直接驱动。低频减载属于前者,启动须等待几个摇摆周期,时间长达数秒。在此过程中可能发生机组停运和大面积停电,恶化电网暂态过程。因此,在电网发生重大事件(如特高压直流受端单极或双极闭锁)时,可立即启动SSCS,快速增加有功出力或减少有功缺额,加快频率恢复过程。

我国能源基地和负荷中心不重叠,有必要采取大容量、远距离交/直流输电<sup>[8-10]</sup>,例如西南到华东、青海到华中、西北到华中直流工程等。这些跨区线路实现分区电网互联,便于共享稳定控制资源,但是需要增加对各分区SSCS的控制层,增加了SSCS结构复杂程度,降低了SSCS通信网络可靠性。

收稿日期:2022-01-10;修回日期:2022-03-24

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“超大规模电网安全稳定控制系统扁平化架构与实现技术研究”(5217022-1000U)

SSCS一般采用树状结构<sup>[11-12]</sup>,一个上层站点控制一个或多个下层站点。其优点是层级清晰,同级站点间相互独立,易于设计和实现控制策略。但若站点或其上游通道故障,下游所有站点和通道将失效。层级越多,上述缺点越明显。为增加可靠性,可在协控总站增加异地备用,但是备用越多,建设和维护成本越高,控制越复杂,误动可能性越大,因此须改进树状SSCS结构以提高其可靠性。

SSCS结构设计需要考虑经济成本、控制复杂性、可靠性等因素。对于SSCS可靠性,现有研究方法包括状态空间<sup>[13-15]</sup>、故障树<sup>[16-17]</sup>、蒙特卡洛抽样<sup>[18]</sup>、复杂网络方法<sup>[19-21]</sup>等。文献[22]提出互联系统SSCS扁平化概念。扁平化SSCS可靠性评估中,站点间存在双向/环状通道,因此不易确定所有控制路径。SSCS扁平化改造效果可由控制力量量化,控制能力不仅取决于通道可用与否,还取决于底层站点可控容量。同时,扁平化的SSCS中站点、路径间关系更加复杂,不易识别薄弱环节、判断关键元件对SSCS控制能力的影响。

文中在树状SSCS中增加双向/环状通信通道,实现扁平化设计。搜索顶层至底层站点间有向路径,计及元件可用率和可控容量,量化SSCS的控制能力;定义站点平均控制能力指标和站点平均关联路径数指标,量化扁平化设计效果;提出SSCS控制能力对站点和通道可用率的灵敏度的解析表达,以确定扁平化SSCS薄弱环节;通过算例分析验证了所提算法的正确性。

# 1 SSCS 扁平化设计方式

## 1.1 传统 SSCS 结构

图 1(a)为传统电网 SSCS 树状结构,其中 S,R 分别为站点和控制资源。顶层站点 S<sub>1</sub>通过通道连接中间站点,控制 6 个底层站点及其资源。当有站点或通道故障时,系统将失去对部分资源的控制。为提升系统控制能力,可适当增加站点或通道。例如,为避免 S<sub>8</sub>和 S<sub>11</sub>故障时失去对 R<sub>1</sub>和 R<sub>4</sub>的控制,增加热备用站点 S<sub>14</sub>和 S<sub>15</sub>,实现对 R<sub>1</sub>和 R<sub>4</sub>的控制以保全系统功能,见图 1(b)。但若 S<sub>2</sub>故障,无论 S<sub>10</sub>是否有备用,R<sub>2</sub>和 R<sub>3</sub>都将失去控制。图 1(c)增加中间站点备用,可以提高系统控制能力,但是将增加成本、控制复杂程度和误动可能性。

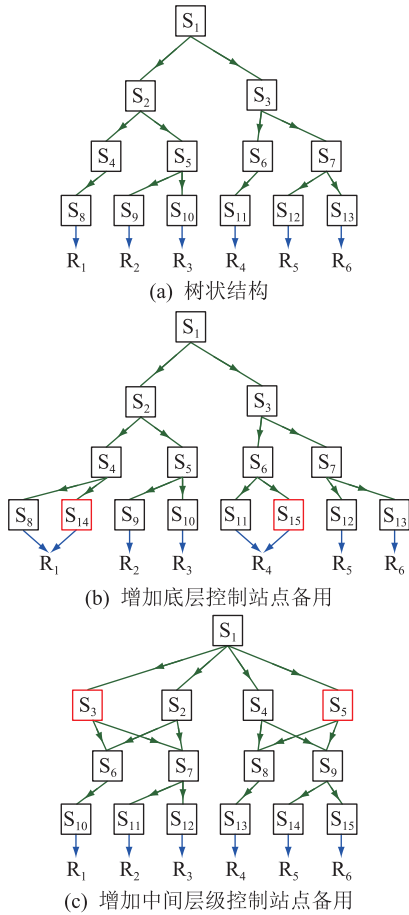


图 1 SSCS A 的结构

Fig.1 Configuration of SSCS A

## 1.2 扁平化 SSCS 结构

对于图 1(a),图 2 给出扁平化设计思路。在中间站点 S<sub>6</sub>和 S<sub>7</sub>间增加横向联系,实现两者相互备用。然后在 S<sub>2</sub>以下,以环网代替第三层站点,此时 S<sub>2</sub>通过环网直接控制 S<sub>8</sub>—S<sub>10</sub>。扁平化后,站点间路径不唯一,例如 S<sub>3</sub>可直达 S<sub>6</sub>,也可经 S<sub>7</sub>到达 S<sub>6</sub>,从而提升了系统的控制能力。

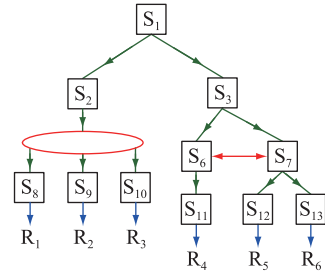


图 2 SSCS A 扁平化设计

Fig.2 Flat design of SSCS A

从分区电网互联角度出发,图 3 通过环形通信通道将 3 个 SSCS 顶层站点联系起来。若一个电网有功需求得不到满足,可以从其他电网获得支援。

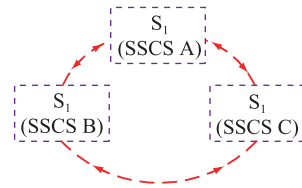


图 3 3 个分区电网 SSCS 互联

Fig.3 Integration of SSCS of three regional systems

实际跨区电网 SSCS 扁平化设计,还须考虑以下因素:

(1) 跨区电网 SSCS 设计主要针对有功平衡和频率稳定,很少考虑无功/电压,因为无功很少进行大容量、远距离传输。

(2) 扁平化设计须兼顾站点功能和重要性、通道建设和维护成本等。有些站点位于枢纽变电站、大机组、负荷中心附近,扁平化设计过程中这些站点必须保留。

(3) 扁平化淡化了站点间层级关系,可能会增加控制复杂程度,实际系统不可能也没必要全部采用环网,只要对部分薄弱站点或通道扁平化,因此薄弱环节辨识对扁平化设计非常重要。薄弱环节辨识取决于控制路径可用率和控制容量。

## 2 SSCS 控制路径搜索

定义从顶层站点到底层站点的任意通路为控制路径。对树状系统,通过观察可以确定所有路径,如图 1(a)中从 S<sub>1</sub>出发有 6 条控制路径,分别控制 R<sub>1</sub>—R<sub>6</sub>;图 1(b)中有 2 个底层备用子站,增加 2 条路径;而图 1(c)、图 2 和图 3 中考虑中间站点备用、站点局部扁平化及多个 SSCS 互联,路径数大幅增加,手动查找容易遗漏,因此建立以下 SSCS 路径算法。

### 2.1 邻接矩阵计算

从拓扑结构来说,可以视站点为顶点,通道为

边,用邻接矩阵  $D$  中的元素  $d_{ij}$  来描述 SSCS 的连通特性。若站点  $i$  有路径指向  $j$ , 定义  $d_{ij}=1$ ; 否则  $d_{ij}=0$ 。将图 2 站点重新排序并标记各通道得到图 4, 根据图 4 结构可得出 11 阶  $D$  矩阵, 如式(1)所示。树状结构 SSCS 的  $D$  矩阵只有上三角有非零元素, 而扁平化 SSCS 的  $D$  矩阵在下三角也有非零元素。

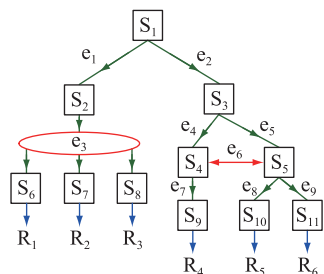


图 4 站点重新编号后的 SSCS A

Fig.4 SSCS A with renumbering to stations

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

## 2.2 路径搜索

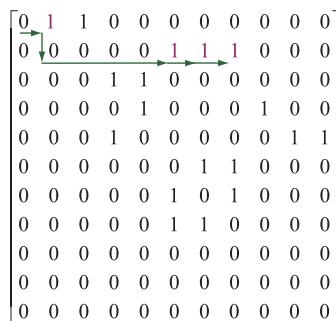
以  $D$  矩阵为基础, 从每个顶层站点出发, 沿着有向路径逐步搜索到底层站点, 可得所有控制路径:

(1) 从  $D$  矩阵第 1 行至第 11 行, 依次展开。如果第  $i$  行对应顶层站点, 记录站点  $i$ , 从第 1 列到第 11 列依次展开; 否则转下一行。

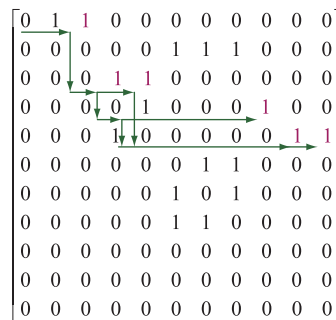
(2) 对第  $i$  行第  $j$  列, 如果  $d_{ij}=0$ , 站点  $i$  和  $j$  间没有通信通道, 分析下一列。如果  $d_{ij}=1$  且  $j$  不是底层站点, 记录通道  $ij$  和站点  $j$ 。对第  $j$  行从第 1 列到第 11 列类似分析  $d_{jk}$ 。如果  $d_{jk}=1$  且  $k$  是底层站点, 记录站点  $k$ , 路径数加 1, 终止该路径搜索。

(3) 为避免在双向或环状通道中循环, 在记录站点和通道时, 需要避免搜索路径的重复。

按照上述原则,  $S_1$  指向  $S_2$  和  $S_3$ 。  $S_2$  指向底层站点  $S_6, S_7, S_8$ , 因此得到 3 条控制路径, 如图 5 所示。  $S_3$  指向  $S_4$  和  $S_5$ ,  $S_4$  指向底层站点  $S_9$ , 路径数加 1;  $S_4$  还指向  $S_5$ ,  $S_5$  指向底层站点  $S_{10}$  和  $S_{11}$ , 路径数加 2。由此可得所有控制路径。



(a)  $S_1-S_2$  的拓扑搜索过程



(b)  $S_1-S_3$  的拓扑搜索过程

图 5 控制路径的拓扑搜索

Fig.5 Topology search to control path

增加横向联系后, SSCS 可能出现环路, 这在变电站通信和电网稳定控制系统中都可能存在。文中在建立连接矩阵时, 已经避免环路重复搜索。和树状网络一样, 环路控制也须明确上下级关系, 只是前者上下级关系静态不变而后者动态变化。

## 3 SSCS 控制能力定义和薄弱环节辨识

### 3.1 SSCS 对各控制资源的可控概率

控制路径所关联元件成串联关系, 因此第  $n$  条路径可用率  $a_n$  是各关联元件可用率  $a_k$  的乘积, 如式(2)所示。与树状系统相比, 扁平化后同一元件关联不同路径的场景大大增加。

$$a_n = \prod_{k \in n} a_k \quad (2)$$

路径中关联元件包括站点和通道。假设站点  $k$  的可用率为  $a_k^{\text{station}}$ , 由式(3)可得路径  $m$  可用率  $a_m^{\text{path}}$ 。通道可用率  $a_k^{\text{cable}}$  与长度呈负相关, 其表达式见式(4)。

$$a_m^{\text{path}} = \prod_{k_1 \in m} a_{k_1}^{\text{station}} \prod_{k_2 \in m} (1 - l_{k_2} u_0^{\text{cable}}) \quad (3)$$

$$a_k^{\text{cable}} = 1 - l_k u_0^{\text{cable}} \quad (4)$$

式中:  $k_1, k_2$  分别为站点和通道编号;  $l_k$  为通道  $k$  的长度;  $u_0^{\text{cable}}$  为单位长度通道的故障概率;  $l_{k_2}$  为路径  $m$  中通道  $k_2$  的长度;  $a_{k_1}^{\text{station}}$  为路径  $m$  中  $k_1$  站点的可用率。

实际通道如专用光纤复合架空地线 (optical

fiber composite overhead ground wire, OPGW) 的可靠性包括电气、机械、光学等方面,任一方面性能下降都可能导致通信功能失效。文献[23]采用 Weibull 函数描述光纤失效概率,但实际光纤可用率受设备材料完好程度、接地方式、沿线地理气候条件(雷击等)、人为因素等影响<sup>[24]</sup>,须结合运行方式和故障类型具体分析,然后代入文中所提模型计算分析。

各控制路径间为并联关系,资源  $n$  可控概率  $A_n$  见式(5),其中  $m$  为 SSSCS 控制资源  $n$  路径的总数。

$$A_n = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - a_i^{\text{path}}) \quad (5)$$

### 3.2 SSSCS 的控制能力

路径可用率越高、可调容量越大,SSCS 控制能力越强。因此定义系统对资源  $n$  的控制能力  $C_n$  为顶层站点对底层站点的可控概率  $A_n$  与其底层站点可控容量  $P_n$  的乘积:

$$C_n = A_n P_n \quad (6)$$

$P_n$  与当前运行方式有关。对于高压直流系统,当前载荷越大,可上调出力越小;对于储能系统,抽水蓄能电站中抽水机组越少,允许切泵量越少。

SSCS 的控制能力为对各资源控制能力之和  $C_{\text{SSCS}}$ ,见式(7),其中  $M$  为控制资源总数。

$$C_{\text{SSCS}} = \sum_{n=1}^M C_n = \sum_{n=1}^M A_n P_n \quad (7)$$

联立式(4)、式(5)和式(7)可得  $C_{\text{SSCS}}$  为:

$$C_{\text{SSCS}} = \sum_{n=1}^M \left\{ 1 - \prod_{i=1, i \in n}^m \left[ 1 - \prod_{k_1 \in i}^{\text{station}} a_{k_1} \prod_{k_2 \in i} (1 - l_{k_2} u_0^{\text{cable}}) \right] \right\} P_n \quad (8)$$

### 3.3 站点平均控制能力指标和站点利用率

扁平化对 SSSCS 的影响是增加了光纤成本和控制路径,提升了控制能力,减少了站点和层级数。为量化扁平化正面效果,定义站点平均控制能力  $\alpha_{\text{SSCS}}$  为控制能力与站点数量  $N_{\text{station}}$  的比值:

$$\alpha_{\text{SSCS}} = \frac{C_{\text{SSCS}}}{N_{\text{station}}} \quad (9)$$

定义 SSSCS 站点平均关联路径数为  $\beta_{\text{SSCS}}$ ,表达为式(10)。路径起止于站点,因此关联元件数  $M_n$  必为奇数。

$$\beta_{\text{SSCS}} = \frac{\sum_{n=1}^M \frac{M_n + 1}{2}}{N_{\text{station}}} \quad (10)$$

### 3.4 SSSCS 薄弱站点辨识

扁平化增加了确定薄弱环节的难度,可以每次断开一条通道或一个站点,比较断开前、后的  $C_{\text{SSCS}}$

和  $\alpha_{\text{SSCS}}$ ,但计算量太大。以下提出薄弱站点辨识解析算法。以站点  $k$  为例,联立式(4)和式(8),计算  $C_{\text{SSCS}}$  关于  $a_k^{\text{station}}$  的灵敏度,见式(11)。灵敏度越大,说明该站点停运对系统影响越大,可对其增加检修频率或设备异地备用,或加强扁平化设计。

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{\text{SSCS}}}{\partial a_k^{\text{station}}} &= \frac{\partial \left\{ \sum_{n=1}^M \left[ 1 - \prod_{i=1}^m (1 - a_i^{\text{path}}) \right] P_n \right\}}{\partial a_k^{\text{station}}} = \\ &= \sum_{n=1}^M P_n \frac{\partial \prod_{k \in N_i} (1 - a_i^{\text{path}})}{\partial a_k^{\text{station}}} \prod_{k \notin N_i} (1 - a_i^{\text{path}}) = \\ &= \sum_{n=1}^M P_n \left[ \sum_{k \in N_i, i=1}^x \frac{-a_i^{\text{path}}}{a_k^{\text{station}}} \prod_{j \neq i} (1 - a_j^{\text{path}}) \right] \times \\ &\quad \prod_{k \in N_i, i=x+1}^m (1 - a_i^{\text{path}}) \quad (11) \end{aligned}$$

式中:  $N_i$  为控制路径  $i$  中站点序号集合。

类似可推导系统控制能力对通道可用率的灵敏度。对灵敏度较大的通道,需要降低故障率、减少修复时间,或者加强扁平化设计。

## 4 算例分析

SSCS 站点可靠性参数参考文献[25],光纤通道可靠性参数参考文献[26]。分区电网 A 中,  $R_1$  可控容量为 300 MW,  $R_2$  可控容量为 200 MW,  $R_3$  可控容量为 100 MW,  $R_4$  可控容量为 100 MW,  $R_5$  可控容量为 50 MW,  $R_6$  可控容量为 100 MW。

### 4.1 不同结构 SSSCS 控制能力计算

计算树状结构、底层备用、中间备用和扁平化结构下 SSSCS 对各控制资源的控制能力,见表 1。与传统树状结构和增加站点备用设计方案相比,增加横向通信通道/环状结构实现扁平化可显著提高 SSSCS 控制能力。

表 1 树状 SSSCS 控制能力

Table 1 Controllability of SSSCS with tree structure

站点	不同结构 SSSCS 控制能力			
	树状	底层备用	中间备用	扁平化
$R_1$	287.73	299.50	299.50	299.98
$R_2$	191.82	191.82	199.67	199.99
$R_3$	95.91	95.19	99.83	99.99
$R_4$	95.91	99.83	99.83	99.79
$R_5$	47.96	47.96	49.92	49.90
$R_6$	95.91	95.91	99.83	99.79

### 4.2 不同结构下分区电网 A 的可靠性指标

针对电网 A,图 6 给出不同 SSSCS 结构的平均控制能力。相比于树状结构,增加站点备用会降低系

统对站点的平均控制能力。相比于增加底层站点备用,增加第二层站点备用,系统平均控制能力指标提高更加明显。局部扁平化增加了通道,减少了站点层级,从而加强了SSCS控制能力。图7给出站点平均关联路径数。可以看出,增加备用或局部扁平化都可提高 $\beta_{SSCS}$ 以及系统对站点的利用率。

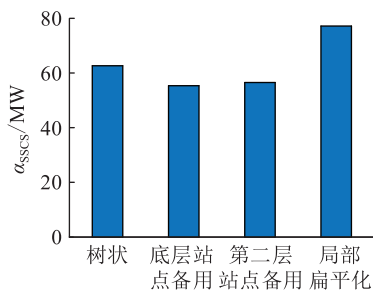


图6 不同结构下分区SSCS的 $\alpha_{SSCS}$

Fig.6  $\alpha_{SSCS}$  of SSCS with different structures

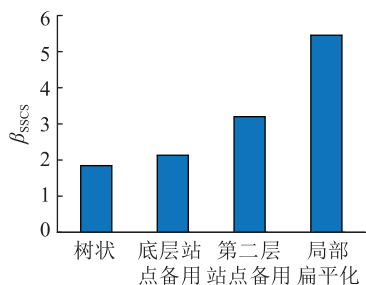


图7 不同结构下SSCS的 $\beta_{SSCS}$

Fig.7  $\beta_{SSCS}$  of SSCS with different structures

### 4.3 扁平化系统薄弱站点确定

SSCS控制能力对站点可用率的灵敏度见图8。站点1层级最高,灵敏度也最大。分别分析站点3、5、10,对于同一支路的树状结构,站点层级越高,控制路径越多,故障后果越严重。

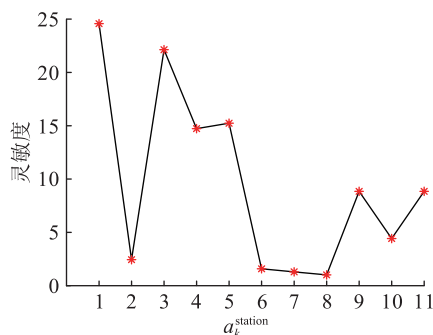


图8  $C_{SSCS}$ 对 $a_k^{station}$ 的灵敏度

Fig.8 Sensitivity of  $C_{SSCS}$  to  $a_k^{station}$

SSCS控制能力对通道可用率的灵敏度见图9。通道2控制 $R_4$ 、 $R_5$ 、 $R_6$ 的所有路径且不可替代,因此对SSCS影响最大。通道1和3均控制 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$ 控制资源的所有路径,故两者灵敏度相同。通道4、5、

7、9对SSCS控制能力的灵敏度相同,因此重新量化通道4、5、7、9对各控制资源控制能力 $C_i$ 的灵敏度,见表3。系统对 $R_4$ 和 $R_6$ 控制能力分别受通道7和9的影响较大。

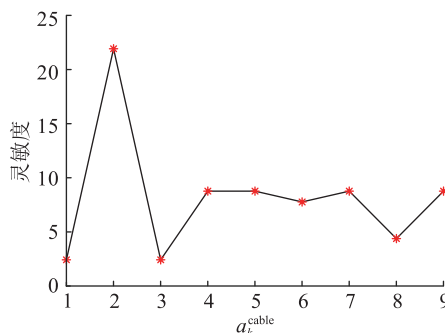


图9  $C_{SSCS}$ 对 $a_k^{cable}$ 的灵敏度

Fig.9 Sensitivity of  $C_{SSCS}$  to  $a_k^{cable}$

表3  $C_i$ 对 $a_k^{cable}$ 的灵敏度

Table 3 Sensitivity of  $C_i$  to  $a_k^{cable}$

通道编号	控制资源		
	$R_4$	$R_5$	$R_6$
4	2.442	2.442	3.883
5	1.941	1.941	4.885
7	8.768	0	0
9	0	0	8.768

## 5 结论

文中针对电网SSCS扁平化需求,搜索顶层/底层站点间所有路径,量化扁平化SSCS控制能力及评估指标,提出灵敏度模型以确定薄弱环节,得到以下结论:

(1) SSCS控制能力与控制路径的可用率和可控容量有关。路径可用率越高,可控容量越大,系统控制能力越好。可以通过增加可用率或路径以提高系统控制能力。

(2) 增加备用或采用扁平化结构能增加SSCS的控制路径。优先增加层级较高站点备用。相比于增加备用,扁平化设计对提高SSCS控制能力的效果更明显。

(3) 站点或通道所关联的路径越多,路径控制容量越大,站点或通道越薄弱,故障影响越大。在SSCS设计中,应优先考虑这些薄弱元件。

文中SSCS扁平化设计考虑了系统可靠性和控制能力。实际扁平化设计还须考虑控制难度和光纤成本等因素,有待进一步研究。

### 参考文献:

[1] 董希建,罗剑波,崔晓丹,等. 安全稳定控制系统全程控制时

- 间及其构成[J]. 电力系统自动化,2018,42(5):163-168.
- DONG Xijian, LUO Jianbo, CUI Xiaodan, et al. Whole control time and its constitution of security and stability control system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 163-168.
- [2] 丁卫东,张丽全,许剑冰,等. 电网安全稳定控制系统标准体系研究评述[J]. 电力工程技术,2021,40(1):58-64.
- DING Weidong, ZHANG Liquan, XU Jianbing, et al. Review of standard system of power grid security and stability control system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(1): 58-64.
- [3] 顾卓远,汤涌,孙华东,等. 基于响应的电力系统安全稳定综合防御技术[J]. 中国电机工程学报,2019,39(4):943-953.
- GU Zhuoyuan, TANG Yong, SUN Huadong, et al. Study on framework of comprehensive defense architecture for power system security and stability [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 943-953.
- [4] 王胜明,徐泰山,陈刚,等. 电网安全稳定控制系统当值策略可实施评估方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(24):126-133.
- WANG Shengming, XU Taishan, CHEN Gang, et al. Practicability assessment method of duty strategy for security and stability control system in power grid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(24): 126-133.
- [5] 周野,刘福锁,常海军,等. 用于频率紧急控制的水电群精准控制策略[J]. 电力系统自动化,2020,44(11):121-126.
- ZHOU Ye, LIU Fusu, CHANG Haijun, et al. Accurate control strategies of hydropower group for frequency emergency control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 121-126.
- [6] 陆崎,任祖怡,徐柯,等. 基于隐枚举法的稳定控制优化切机方法[J]. 电力系统自动化,2016,40(5):139-144.
- LU Qi, REN Zuyi, XU Ke, et al. Optimal generator tripping scheme based on implicit enumeration method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(5): 139-144.
- [7] 李德胜,罗剑波. 特高压直流配套安全稳定控制系统的典型设计[J]. 电力系统自动化,2016,40(14):151-157.
- LI Desheng, LUO Jianbo. Typical design of security and stability control system for UHVDC transmission [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 151-157.
- [8] 朱泽翔,李诗旸,张建新,等. 南方电网多直流协调稳定控制系统实现与验证[J]. 南方电网技术,2020,14(12):10-16.
- ZHU Zexiang, LI Shiyang, ZHANG Jianxin, et al. Implementation and verification of multi-DC coordinated stability control system in China southern powergrid [J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 10-16.
- [9] DONG X J, SING H C, JIA H P, et al. Reliability analysis of security and stability control system with typical structure in power grids [C]//2019 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Atlanta, GA, USA. IEEE, 2019:1-5.
- [10] YU W J, XUE Y S, LUO J B, 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.
- [11] 沈凤杰,张伟,张浩,等. 适应调控一体化模式的安控装置管理系统方案设计与实践[J]. 电力系统自动化,2017,41(23):143-149.
- SHEN Fengjie, ZHANG Wei, ZHANG Hao, et al. Design and practice of management system for safety and stability control devices adapted to integrated mode of power grid dispatching and control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(23): 143-149.
- [12] 黄天聪,邓礼力,薛武,等. 输变电设备物联网通信网络结构及拓扑分析[J]. 高电压技术,2015,41(12):3922-3928.
- HUANG Tiancong, DENG Lili, XUE Wu, et al. Communication network structure and topology analysis of Internet of Things for power transmission and transformation equipment [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3922-3928.
- [13] 郗朝辉,李威,崔晓丹,等. 基于分层马尔可夫的可修复稳定控制系统可靠性分析[J]. 中国电力,2020,53(3):101-109.
- QIE Zhaohui, LI Wei, CUI Xiaodan, et al. Reliability analysis of repairable stability control system based on hierarchical Markov [J]. Electric Power, 2020, 53(3): 101-109.
- [14] HE R W, XIE H J, DENG J H, et al. Reliability modeling and assessment of cyber space in cyber-physical power systems [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3763-3773.
- [15] BAI G H, LIU T, ZHANG Y N, et al. An improved method for reliability evaluation of two-terminal multistate networks based on state space decomposition [J]. IEEE Transactions on Reliability, 2021, 70(3): 1084-1095.
- [16] 李辉,邓吉利,姚然,等. 计及运行工况的MMC换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):108-114.
- LI Hui, DENG Jili, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 108-114.
- [17] GJORGIEV 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.
- [18] 朱介北,邱威,孙宁,等. 基于序贯蒙特卡洛法的安全稳定控制系统架构可靠性分析[J]. 电力系统自动化,2021,45(15):21-27.
- ZHU Jiebei, QIU Wei, SUN Ning, et al. Reliability analysis of security and stability control system architecture based on sequential Monte Carlo method [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(15): 21-27.
- [19] 刘涤尘,冀星沛,王波,等. 基于复杂网络理论的电力通信网拓扑脆弱性分析及对策[J]. 电网技术,2015,39(12):3615-3621.
- LIU Dichen, JI Xingpei, WANG Bo, et al. Topological vulnerability analysis and countermeasures of electrical communication

- network based on complex network theory [J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3615-3621.
- [20] 刘威,张东霞,丁玉成,等. 基于随机矩阵理论与熵理论的电网薄弱环节辨识方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(20): 5893-5901.  
LIU Wei, ZHANG Dongxia, DING Yucheng, et al. Power grid vulnerability identification methods based on random matrix theory and entropy theory [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(20): 5893-5901.
- [21] 刘鑫蕊,李欣,孙秋野,等. 考虑冰灾环境的配电网态势感知和薄弱环节辨识方法[J]. 电网技术, 2019, 43(7): 2243-2252.  
LIU Xinrui, LI Xin, SUN Qiuye, et al. A new method for situation awareness and weakness identification of distribution network considering ice disaster [J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2243-2252.
- [22] 辛培哲,闫培丽,肖智宏,等. 新一代智能变电站通信网络技术应用研究[J]. 电力建设, 2013, 34(7): 17-23.  
XIN Peizhe, YAN Peili, XIAO Zhihong, et al. Application of communication network technology in new generation smart substation [J]. Electric Power Construction, 2013, 34(7): 17-23.
- [23] 郭思嘉,赵振东,张倩宜. 基于 Weibull 函数分布的电力通信网光缆失效率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(17): 92-99.  
GUO Sijia, ZHAO Zhendong, ZHANG Qianyi. Failure rate model for optical fiber cable in electric power communication network based on Weibull distribution function [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 92-99.
- [24] 王倩,吴田,施荣,等. 750 kV 输电线路光纤复合架空地线的接地方式[J]. 高电压技术, 2011, 37(5): 1274-1280.  
WANG Qian, WU Tian, SHI Rong, et al. Grounding mode of optical fiber composite overhead ground wire of 750 kV [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1274-1280.
- [25] 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.  
YAN Yunsong, SUN Ning, ZHANG Nan, et al. Evaluation of unavailability risk of the security and stability control system of power systems based on optimization of the preventive maintenance period [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(17): 139-146.
- [26] 赵丽莉,王梦璋,倪明,等. 安全稳定控制装置硬件系统可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(13): 67-73.  
ZHAO Lili, WANG Mengxun, NI Ming, et al. Analysis of hardware system's reliability of security and stability control device [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(13): 67-73.

作者简介:



李生虎

李生虎(1974),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为电力系统建模与可靠性分析、风电并网电力系统分析与控制、特高压直流和柔性交流输电(E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn);

周慧敏(1998),女,硕士在读,研究方向为特高压直流和稳定控制系统可靠性;

颜云松(1981),男,博士在读,高级工程师,从事电力系统安全稳定控制相关工作。

### Vulnerability differentiation to flat security and stability control system

LI Shenghu<sup>1</sup>, ZHOU Huimin<sup>1</sup>, YAN Yunsong<sup>2</sup>, HAN Wei<sup>3</sup>, REN Jianfeng<sup>2</sup>, SONG Chuang<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

3. State Grid Henan Electric Power Company Research Institute, Zhengzhou 450052, China)

**Abstract:** The flat design of security and stability control system (SSCS) can realize the information interaction between each control sub-station and each sub-grid, which is conducive to reducing the number of SSCS layers and improving its reliability, thus increasing the difficulty of searching the control paths and differentiating the vulnerable components. The bidirectional/loop communication channels are added to the tree-shape SSCS to reduce the intermediate stations and find all the paths from the top to bottom stations based on the adjacent matrix. Considering availability of components and controllable capacity of underlying stations, the control capability of the flat SSCS is newly quantified. Average control ability and average associated path number are defined to evaluate the influence of flattening on the control ability of each station. Analytical sensitivity model of the control capability of flat SSCS with respect to the components' availability is proposed to determine the vulnerable components. The numerical analysis shows that the flat design reduces levels and intermediate stations, and improves the controllability of the SSCS. The impact on the controllability of the SSCS increases by the number of paths and controllable power, but decreases by the number of layers.

**Keywords:** security and stability control system (SSCS); flat design; controllability; vulnerability; sensitivity model; interconnected power system