

DOI: 10.7667/PSPC151456

含 TCSC 电力系统可靠性非同调分析

李生虎, 于丽萍, 董王朝

(合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009)

摘要: 判别非同调元件及其参数, 有助于改善电力系统可靠性。计及可控串补及其旁路断路器, 建立可控串补线路三状态模型, 继而建立含串补线路电力系统可靠性解析模型。从串补线路输电能力和系统失负荷概率两个角度, 分析可靠性参数非同调和元件非同调, 定义同调裕度, 推导非同调临界条件。量化了补偿度、可靠性参数、系统负荷水平、串补线路载荷约束对非同调的影响。算例结果表明: 可控串补或断路器不可用率大于临界值时系统非同调; 补偿度越小、负荷水平越低、串补线路载荷约束范围越宽, 系统非同调越容易发生; 相比可控串补, 断路器故障更易使系统非同调。

关键词: 可靠性非同调; 可控串补; 同调裕度; 临界非同调; 断路器

Analysis of reliability non-coherence of power systems with TCSC

LI Shenghu, YU Liping, DONG Wangchao

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Recognizing the non-coherent components helps to improve reliability of power systems. Considering stochastic failure of thyristor controlled series capacitor (TCSC) and its circuit breaker, a three-state model is proposed for the series-compensated line, based on which the analytical reliability model for the power systems is derived. Parameter and component non-coherences are analyzed based on the transmission capability of the line with TCSC and loss of load probability (LOLP) of the system. Coherence margin is defined and the critical condition of non-coherence is given. Impacts of compensation degree, reliability parameters, load level, and loading constraint on non-coherence are analyzed. The numerical results show that the system is non-coherent when the reliability parameter of the series compensator or its breaker is larger than the critical value. Less compensation degree, lower load level, or higher loading constraint yields higher possibility of reliability non-coherence. System non-coherence is more vulnerable to the series component than the circuit breaker of the TCSC.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277049).

Key words: reliability non-coherence; TCSC; coherence margin; critical non-coherence; circuit breaker

0 引言

电力系统可靠性非同调现象, 可从两个角度予以描述。首先是元件非同调与可靠性参数非同调, 前者指投入(退出)元件会降低(提高)系统可靠性; 后者指元件可用率增加(降低)会降低(提高)系统可靠性。其次是绝对非同调和条件非同调, 前者意味着在任何情况下元件对系统可靠性都起负面作用, 一般在规划设计阶段已经避免; 后者指在特定系统结构、运行参数和扰动下, 才会出现可靠性非同调。

辨别非同调元件及非同调参数, 对提高系统可靠性有积极作用。文献[1]提到非同调现象。文献[2]提出发电系统中不存在非同调, 而发输电系统和配电网可能出现。文献[3-4]给出可靠性非同调示例, 证实非同调现象。文献[5]分析了配网非同调, 提出考虑开关故障的配网可靠性评估分块算法, 分析了元件经济性及其可靠性参数、负荷对非同调的影响。文献[6]研究多回线路非同调, 推导非同调临界负荷, 用非同调概率、频率及时间来描述非同调程度。文献[7]研究配电站典型接线非同调, 用非同调概率、频率及电量来量化, 分析负荷和可靠性参数对非同调的影响。文献[8]采用相关性分析探讨发输电

系统可靠性非同调元件辨识。

可控串补(thyristor controlled series capacitor, TCSC)是柔性交流输电(flexible AC transmission system, FACTS)设备的一种,用于提高输电容量、降低网损、改善稳定性、抑制低频振荡和次同步谐振^[9-11],改善系统可靠性。文献[12-13]分别将 FACTS 设备用于电压调节和无功补偿。文献[14-15]利用 FACTS 提高川渝和新疆电网输电能力。文献[16]考虑负荷和发电机出力不确定性,结合灵敏度与蒙特卡罗仿真,以输电能力和收益最大为目标,优化 TCSC 安装位置和容量。文献[17-19]分别利用连续潮流法、改进粒子群法、免疫算法,从输电能力角度对 TCSC 进行优化配置。但是文献[14-19]没有考虑 FACTS 自身可靠性及系统可靠性。文献[20]研究了柔性输电设备短期可靠性,但没有研究其对电力系统可靠性的影响。文献[21]从可靠性成本/效益角度对 FACTS 安装位置和容量进行优化,但是没有考虑 FACTS 本身故障。文献[22]对含 FACTS 系统进行可靠性评估以优化 FACTS 安装位置。文献[23]采用容量灵敏度启发式算法对 FACTS 进行优化配置,TCSC 故障旁路后线路继续运行,没有考虑断路器故障。文献[24]基于 TCSC 结构和故障模式,考虑时变故障率,评估含 TCSC 电网运行风险,假设开关完全可靠。文献[25]研究 TCSC 接入系统运行可靠性,但未提到 TCSC 及其旁路断路器可靠性。文献[26]建立 4 模块 TCSC 的 6 状态模型,考虑了开关故障,在双回线路输电系统上进行了评估。文献[27]在文献[26]基础上完善了状态空间,建立了含 4 模块 TCSC 线路简化可靠性模型。

如果 TCSC 及其旁路断路器经常故障,可能会造成电力系统可靠性非同调,但是目前还未发现相关研究成果。本文针对含 TCSC 电力系统,把 TCSC 等效为等值电抗与输电线路串联,考虑旁路断路器与 TCSC 并联,串补线路采用正常运行、TCSC 被旁路线路恢复运行、串补线路退出的三状态模型,计及其他元件随机故障,用解析法求取串补线路载荷期望值和电力系统失负荷概率(Loss of Load Probability, LOLP),对 TCSC 和断路器不可用率灵敏度进行了同调分析,定义同调裕度,分析非同调条件,推导临界非同调时 TCSC 和断路器不可用率。算例分析验证了算法的正确性和应用价值。

1 含 TCSC 电力系统可靠性模型

含可控串补电力系统见图 1,TCSC 等效为等值电抗 x_{TCSC} ,串联在输电线路 m-n 中, Z_{mn} 为线路阻抗。TCSC 故障时,可通过断路器(circuit breaker, CB)

将 TCSC 旁路,线路恢复正常运行。

1.1 元件可靠性模型

设系统共有 N 个元件,除串补线路以外元件采用正常和停运两状态模型,可用率和不可用率分别为

$$a_i = P(S_i = 1) = \mu_i / (\lambda_i + \mu_i) \quad (1)$$

$$u_i = P(S_i = 0) = 1 - a_i = \lambda_i / (\lambda_i + \mu_i) \quad (2)$$

式中: a 、 u 、 λ 、 μ 分别表示可用率、不可用率、故障率、修复率; S 表示元件状态的离散变量,取值 1 和 0 分别表示元件正常运行和故障停运; i 表示电力系统中第 i 个元件。

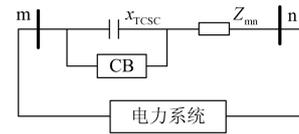


图 1 含 TCSC 电力系统简化图

Fig. 1 Simplified figure of power system with TCSC

取串补线路为第 k 个元件,考虑 TCSC、CB、线路随机故障,将串补线路分为三种运行方式:1 为 TCSC 和线路正常运行;2 为 TCSC 故障后被 CB 旁路,线路恢复运行;3 为 TCSC 故障且 CB 故障,或线路故障,串补线路退出运行。建立串补线路三状态模型见图 2,状态概率为

$$P_1 = P(S_k = 1) = a_T a_L \quad (3)$$

$$P_2 = P(S_k = 2) = u_T a_C a_L \quad (4)$$

$$P_3 = P(S_k = 3) = u_T u_C a_L + u_L \quad (5)$$

式中: P 表示状态概率; T、C、L 分别表示 TCSC、CB、安装 TCSC 的线路。

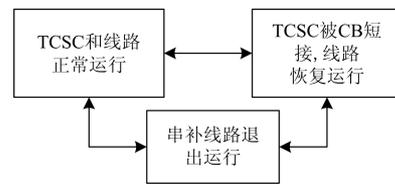


图 2 串补线路的三状态模型

Fig. 2 Three state models for the line with TCSC

1.2 含 TCSC 电力系统可靠性的解析模型

用串补线路载荷期望值表征串补线路输电能力大小,用 LOLP 表征系统可靠性优劣。采用状态枚举法,枚举系统故障状态,将所有枚举系统状态下的串补线路电流值(模值)概率加权,将所有枚举系统状态下 LOLP 累加,得到串补线路载荷期望值以及系统 LOLP。按照串补线路三种运行方式对其进行分解,解析表达如下:

$$E(I) = P_1 H_1 + P_2 H_2 \quad (6)$$

$$H_1 = \sum_{x_1 \in X_1, S_k=1, i=1, i \neq k} \prod_{i=1}^N P(S_i^{x_1}) I_k^{x_1} \quad (7)$$

$$H_2 = \sum_{x_2 \in X_2, S_k=2, i=1, i \neq k} \prod_{i=1}^N P(S_i^{x_2}) I_k^{x_2} \quad (8)$$

$$P_{\text{LOLP}} = P_1 K_1 + P_2 K_2 + P_3 K_3 \quad (9)$$

$$K_1 = \sum_{x_1 \in X_1, S_k=1, i=1, i \neq k} \prod_{i=1}^N P(S_i^{x_1}) F(\mathbf{x}_1) \quad (10)$$

$$K_2 = \sum_{x_2 \in X_2, S_k=2, i=1, i \neq k} \prod_{i=1}^N P(S_i^{x_2}) F(\mathbf{x}_2) \quad (11)$$

$$K_3 = \sum_{x_3 \in X_3, S_k=3, i=1, i \neq k} \prod_{i=1}^N P(S_i^{x_3}) F(\mathbf{x}_3) \quad (12)$$

式中: I 为电流值; E 表示期望值; \mathbf{x} 为系统故障状态, \mathbf{X} 表示系统故障状态集合; H 表示不同系统状态下除串补线路外其他元件状态概率与串补线路电流值乘积之和; F 取 0 时系统正常, 取 1 时故障; K 表示除串补线路以外的元件故障导致系统失负荷概率之和。

2 含 TCSC 电力系统的非同调分析

2.1 TCSC 和 CB 可靠性参数非同调分析

一般需要充分利用容性 TCSC 提高线路输电能力, $H_1 > H_2$, 由式(3)、式(4)和式(6)得串补线路载荷期望值对 u_T, u_C 灵敏度 $-a_L(H_1 - a_C H_2) < 0, -u_T a_L H_2 < 0$ 。 u_T, u_C 越大, $E(I)$ 越小, 关于 TCSC 和 CB 可靠性参数同调。

由式(3)、式(4)及式(9)~式(12)得 LOLP 对 u_T, u_C 灵敏度为 $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_T, \partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_C$ 。系数 $K_1 \sim K_3$ 与系统故障恶劣情况相关, 设方式 3 比方式 1 更恶劣, 即 $K_3 > K_1$; 方式 3 不会优于方式 2, 即 $K_3 \geq K_2$; 方式 2 不会优于方式 1, 即 $K_2 \geq K_1$ 。分三种情况: (1) $K_3 > K_2 > K_1$, $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_T > 0$ 且 $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_C > 0$, 同调; (2) $K_3 = K_2 > K_1$, $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_T > 0$ 同调, $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_C = 0$ 与 u_C 无关; (3) $K_3 > K_2 = K_1$, $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_T > 0$ 且 $\partial P_{\text{LOLP}} / \partial u_C > 0$, 同调。因此, 串补线路载荷期望和系统 LOLP 关于 TCSC 和 CB 可靠性参数同调。

2.2 TCSC 和 CB 元件非同调分析

1) 以串补线路载荷期望为依据

安装 TCSC 前线路载荷期望值为 $E'(I) = a_L H_2$, 则串补线路载荷期望值差异为

$$\Delta E(I) = E(I) - E'(I) = a_L (a_T H_1 + u_T a_C H_2 - H_2) \quad (13)$$

由此确定同调条件:

$$a_T H_1 + u_T a_C H_2 - H_2 > 0 \quad (14)$$

定义期望载荷同调裕度:

$$\ell = \frac{H_1 - H_2}{H_2} - \frac{u_T u_C}{1 - u_T} > 0 \quad (15)$$

对 u_T 和 u_C 求偏导:

$$\begin{cases} \partial \ell / \partial u_T = -u_C / (1 - u_T)^2 < 0 \\ \partial \ell / \partial u_C = -u_T / (1 - u_T) < 0 \end{cases} \quad (16)$$

u_T 或 u_C 越大, ℓ 越小, 同调程度越低, 非同调可能性越大, 可能导致 $\ell < 0$ 非同调。定义临界非同调条件 $\ell = 0$, 得 TCSC 和 CB 临界非同调不可用率为

$$u_T^{\text{cri}, E(I)} = \frac{H_1 - H_2}{H_1 - H_2 + H_2 u_C} > 0 \quad (17)$$

$$u_C^{\text{cri}, E(I)} = \frac{(H_1 - H_2)(1 - u_T)}{H_2 u_T} > 0 \quad (18)$$

式中, 上标 cri 表示临界值。

若式(17)和式(18)小于 1 且不接近 1, 则会出现非同调, 当 $u_T > u_T^{\text{cri}, E(I)}$ 或 $u_C > u_C^{\text{cri}, E(I)}$ 时, $\ell < 0$, 安装 TCSC 后串补线路载荷下降, 系统非同调; 若式(17)和式(18)接近 1 或大于 1, 则系统一定同调。

2) 以系统 LOLP 为依据

根据安装 TCSC 后与安装前 LOLP 差值确定同调条件 $\Delta P_{\text{LOLP}} < 0$, 定义 LOLP 同调裕度:

$$\rho = \frac{K_3 - K_2}{K_3 - K_1} - \frac{1 - u_T}{1 - u_T + u_C u_T} < 0 \quad (19)$$

对 u_T 和 u_C 求偏导, u_T 或 u_C 越大, ρ 越大, 可能导致 $\rho > 0$ 非同调。定义临界条件为 $\rho = 0$, 则 TCSC 和 CB 临界非同调不可用率为

$$u_T^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}} = \frac{K_2 - K_1}{K_2 - K_1 + (K_3 - K_2) u_C} \quad (20)$$

$$u_C^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}} = \frac{(K_2 - K_1)(1 - u_T)}{(K_3 - K_2) u_T} \quad (21)$$

按照 $K_1 \sim K_3$ 大小, 分三种情况讨论: (1) $K_3 > K_2 > K_1$, $\rho < 0$, $u_T^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}}$ 小于 1 且接近 1, $u_C^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}}$ 大于 1。不论 u_T 和 u_C 取何值, 一定同调; (2) $K_3 = K_2 > K_1$, $\rho < 0$, $u_T^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}} = 1$, $u_C^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}}$ 分母为零无意义, 不论 u_T 和 u_C 取何值, 始终同调; (3) $K_3 > K_2 = K_1$, $\rho > 0$, $u_T^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}} = u_C^{\text{cri}, P_{\text{LOLP}}} = 0$, 只要 TCSC 和 CB 非绝对可靠, 从 LOLP 来说, 系统总是非同调。

3 算例分析

以 IEEE-RTS 系统为例, 在支路 16-17 安装 TCSC, 验证是否存在可靠性非同调。选取 u_T, u_C, u_L 的初始值为 0.011 844 33、0.000 365 16、0.000 940 89,

TCSC 补偿度初始值为-0.2(容性补偿), 系统负荷为峰荷, 串补线路载荷约束为 $I_{\max}=6.25$ p.u.。

3.1 TCSC 和 CB 可靠性参数同调

表 1 给出 $E(I)$ 关于 u_T 、 u_C 灵敏度及 LOLP 对 u_T 、 u_C 灵敏度。 $E(I)$ 对 u_T 、 u_C 灵敏度为负, 即 u_T 、 u_C 越大, $E(I)$ 越小, 可靠性参数同调。从 LOLP 看, 情况 2 时 LOLP 对 u_C 灵敏度为 0, LOLP 与 u_C 变化无关; 其他灵敏度大于零, 即不可用率越大, 越易失负荷, 可靠性参数同调。没有发现串补线路载荷期望和 LOLP 关于 TCSC 和 CB 可靠性参数非同调。

表 1 $E(I)$ 和 LOLP 对 u_T 和 u_C 灵敏度

Table 1 Sensitivities of $E(I)$ and LOLP with respect to u_T and u_C

u	$E(I)$		LOLP	
	$H_1 > H_2$	$K_3 > K_2 > K_1$	$K_3 = K_2 > K_1$	$K_3 > K_2 = K_1$
u_T	-0.030 18	0.002 204	0.000 140	0.014 039
u_C	-0.005 98	0.013 518	0.000 000	0.013 371

3.2 TCSC 和 CB 元件非同调

1) TCSC 容性补偿度对非同调的影响

保持其他初始条件不变, 将 TCSC 的容性补偿度分别设为-0.2、-0.01、-0.001, 由式(17)、式(18)、式(20)、式(21)求取临界不可用率, 如表 2。

表 2 不同补偿度时的临界不可用率

Table 2 Critical unavailability for different compensation degrees

补偿度	u^{cri}	$E(I)$	degrees		
			$H_1 > H_2$	LOLP	$K_1 \sim K_3$
-0.2	u_T	0.993 888 9	$H_1 > H_2$	0.998 124 5	$K_3 > K_2 > K_1$
	u_C	4.954 713 15		16.213 409 3	
-0.01	u_T	0.885 070 7	$H_1 > H_2$	0.000 000 0	$K_3 > K_2 = K_1$
	u_C	0.234 611 55		0.000 000 0	
-0.001	u_T	0.434 444 3	$H_1 > H_2$	0.000 000 0	$K_3 > K_2 = K_1$
	u_C	0.023 402 4		0.000 000 0	

从期望载荷看, 补偿度为-0.2 时, u_C 临界值大于 1, u_T 临界值近似为 1, 不会非同调; 补偿度为-0.01 时, 两个临界值都小于 1, 但一般不会出现, 也不会非同调; 补偿度为-0.001 时, u_T 临界值较大, 不会因为 TCSC 经常故障造成非同调, 而 u_C 临界值为 0.023 4, 当 u_C 大于该值, 安装 TCSC 后, 因为 CB 经常故障降低输电能力引起非同调。

从 LOLP 看, 补偿度为-0.2 时, $K_3 > K_2 > K_1$, 两个临界值不可能发生, 因而此时一定同调; 补偿度为-0.01 和-0.001 时, $K_3 > K_2 = K_1$, 两个临界值都为 0, 此时 TCSC 没有改善 LOLP, 通常 TCSC 和 CB 不是绝对可靠, 所以从 LOLP 来说, 是非同调的。

表 2 中很多临界不可用率都是不可能发生的, 但是从数值上看, 补偿度绝对值越小, 临界不可用

率越小, 非同调现象出现可能性越大。即补偿度绝对值越小, 容抗抵消线路感抗越少, 串补线路电流越小, 期望载荷越小, 同时节点电压会变大, 越限可能越大, LOLP 增加, 所以越容易非同调。

其他条件一定, 补偿度为-0.001 时期望载荷差值和 LOLP 差值随 u_C 变化曲线如图 3 所示, 进一步说明此时超过临界不可用率时 TCSC 使输电能力降低, 使 LOLP 升高, 因此是非同调的。

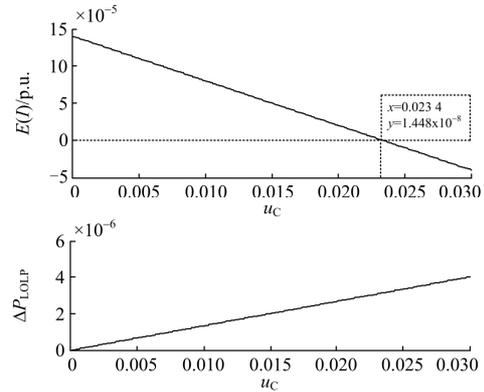


图 3 $\Delta E(I)$ 和 ΔP_{LOLP} 与 u_C 关系

Fig. 3 Relationships of $\Delta E(I)$ and ΔP_{LOLP} between with u_C

2) u_T 和 u_C 同时变化对非同调的影响

以上 u_T 和 u_C 非同调临界值是保持其中一个不变求取的, 实际不可能满足, 即其他条件一定时, 同调裕度是 u_T 和 u_C 的函数。以串补线路期望载荷为例, $\ell = f(u_T, u_C)$, $\ell < 0$ 为非同调。当补偿度为-0.001 时, 同调性受参数影响见图 4。

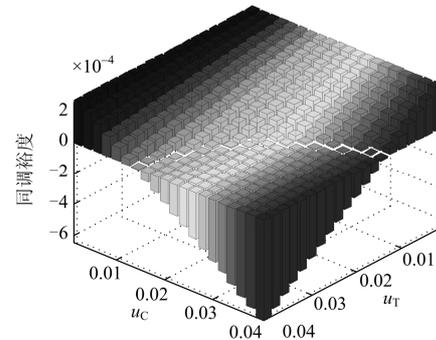


图 4 同调裕度与 u_T 和 u_C 的关系

Fig. 4 Relationship of coherence margin between with u_T and u_C

3) 负荷水平对非同调的影响

补偿度为-0.001, 其他条件不变, 系统总负荷分别为峰荷的 1.1、1.0、0.952、0.900 倍时, 临界不可用率见表 3。

表 3 中数据, 从期望载荷上来看, u_T 临界值不可能发生, u_C 临界值会发生。当 u_T 和 u_C 增加时, 临界值都变小, 类似图 4; 随着负荷降低, 总体上

两个临界值降低, 说明负荷水平较低时安装 TCSC 更容易出现非同调现象。从 LOLP 来说, 1.1 倍负荷时, 枚举系统状态都切负荷, $K_3=K_2=K_1$, 此时 $\Delta P_{LOLP}=0$; 其他情况时都有 $K_3>K_2=K_1$, 临界值为 0, 只要 TCSC 和 CB 不是绝对可靠, 从 LOLP 来说, 系统非同调。对比表 3 和表 2 可见, 补偿度对期望负荷非同调的影响比负荷大, 而负荷对系统 LOLP 非同调影响更大。

表 3 不同负荷水平时的临界不可用率

Table 3 Critical unavailability for different load levels

倍数	u^{cri}	$E(I)$	H_1, H_2	LOLP	$K_1 \sim K_3$
1.1	u_T	0.435 501 6	$H_1>H_2$	—	$K_3=K_2=K_1$
	u_C	0.023 503 3		—	
1.0	u_T	0.434 444 3	$H_1>H_2$	0.000 000	$K_3>K_2=K_1$
	u_C	0.023 402 4		0.000 000	
0.952	u_T	0.434 444 3	$H_1>H_2$	0.000 000	$K_3>K_2=K_1$
	u_C	0.023 402 4		0.000 000	
0.900	u_T	0.433 939 9	$H_1>H_2$	0.000 000	$K_3>K_2=K_1$
	u_C	0.023 354 4		0.000 000	

4) 串补线路负荷上限对非同调的影响

设无 TCSC 时线路热载荷上限为 I_{Lmax} , 考虑暂稳态等其他约束时, 变为 I_{Lmax1} , 加入 TCSC 后提升到 I_{Lmax2} , 且有 $I_{Lmax1} < I_{Lmax2} \leq I_{Lmax}$ 。设串补运行时, 电流不超过 I_{Lmax2} ; 串补旁路时, 不超过 I_{Lmax1} 。保持 $I_{max}=6.25$ p.u. 不变, 取多组 I_{max1} 和 I_{max2} , 求取补偿度为 -0.001 且系统为 1.0 倍峰荷时, 各个非同调临界值如表 4 所示。

表 4 不同载荷约束时的临界不可用率

Table 4 Critical unavailability for different current constraints

I_{Lmax1}/I_{Lmax}	I_{Lmax2}/I_{Lmax}	u^{cri}	$E(I)$	H_1, H_2	LOLP	$K_1 \sim K_3$
1.0	1.0	u_T	0.434 444 29	$H_1>H_2$	0.000 000	$K_3>K_2=K_1$
		u_C	0.023 402 42		0.000 000	
0.7	0.6	u_T	0.728 749 64	$H_1>H_2$	0.000 000	$K_3>K_2=K_1$
		u_C	0.081 848 38		0.000 000	
0.7	0.5	u_T	0.988 560 85	$H_1>H_2$	1.000 000	$K_3=K_2>K_1$
		u_C	2.632 762 68		—	
0.55	0.5	u_T	0.987 441 99	$H_1>H_2$	1.000 000	$K_3=K_2>K_1$
		u_C	2.395 481 78		—	

从期望负荷来看, 仅仅 u_T 变化不会导致期望负荷非同调的发生; I_{max1} 和 I_{max2} 取值越低, 串补线路电流越限越多, 约束作用越强, 非同调可能性越小。从 LOLP 来看, 前两种约束属于 $K_3>K_2=K_1$, 因为 TCSC 和串补不是绝对可靠, 就 LOLP 来说, 系统

是非同调的; 后两种情况属于 $K_3=K_2>K_1$, 此时同调。

4 结论

本文研究了含 TCSC 电力系统可靠性非同调问题。考虑 TCSC 和 CB 随机故障, 将串补线路分为三种运行方式, 给出串补线路期望载荷和系统 LOLP 解析表达。推导串补线路期望载荷和系统 LOLP 对 TCSC 和 CB 不可用率灵敏度, 判断可靠性参数非同调, 确定同调条件, 定义同调裕度, 推导临界非同调时 TCSC 和 CB 不可用率。

1) 串补线路期望载荷和系统 LOLP 关于 TCSC 和 CB 不可用率没有可靠性参数非同调现象出现。

2) 若 TCSC 或 CB 临界非同调不可用率小于 1 且不接近 1, 则 TCSC 或 CB 不可用率大于临界值时系统非同调, 反之同调; 若临界值大于 1 或接近 1, 则系统一定同调; 若临界值等于 0, 则系统一定非同调。

3) 补偿度越小、系统负荷水平越低, 串补线路允许载荷约束范围越宽, 非同调现象越容易发生。补偿度对期望负荷非同调影响更大, 系统负荷水平对系统 LOLP 非同调影响更大。

4) 当 TCSC 不可用率不变时, 仅由 CB 不可用率变大容易导致非同调; 反过来, 仅由 TCSC 不可用率变大不易造成非同调。因此相比 TCSC 而言, CB 经常故障更易造成非同调。若计及二者同时变化, 由同调裕度二元函数, 可得非同调时 TCSC 和 CB 不可用率范围。

5) 不考虑其他元件可靠性参数变化时, 期望载荷系数始终保持 $H_1>H_2$; 而 LOLP 出现四种情况, 当 $K_3=K_2=K_1$ 时, 安装 TCSC 前后 LOLP 相同; 当 $K_3>K_2>K_1$ 以及 $K_3=K_2>K_1$ 时; 一定同调, 当 $K_3>K_2=K_1$ 时, 一定非同调。

基于非同调辨识结果, 运行规划部门可采取有效措施来改善系统输电能力和可靠性。当 TCSC 或 CB 不可用率大于临界值时, 使 TCSC 退出运行、增加补偿度或加强维护等措施, 以便系统恢复同调, 提高系统输电能力和可靠性。

参考文献

[1] BILLINTON R, LI Wenyuan. Reliability assessment of electric power systems using Monte Carlo methods[M]. New York: Plenum Press, 1994.

[2] BILLINTON R, ALLEN R B. Reliability assessment of power systems[M]. New York: Plenum Press, 1996.

[3] LI Wenyuan, KORCZYNSKI J K. Risk evaluation of transmission system operation modes and its application at British Columbia Transmission Corporation[J]. IEE

- Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(5): 658-664.
- [4] 李文沅, 周家启, 谢开贵, 等. 在输电线和变电站组合联接网络中的非同调现象[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 7-11.
LI Wenyuan, ZHOU Jiaqi, XIE Kaigui, et al. Non-coherence phenomenon in combinative transmission line and substation configurations[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 7-11.
- [5] 谢开贵, 李万年. 配电网可靠性非同调分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(3): 18-23.
XIE Kaigui, LI Wannian. Analysis of reliability non-coherence in distribution power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2011, 23(3): 18-23.
- [6] 纪静, 谢开贵, 曹侃, 等. 多回并列运行输电线路的可靠性非同调辨识[J]. 高电压技术, 2011, 37(4): 1022-1028.
JI Jing, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Recognizing the reliability non-coherence components of multiple parallel transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(4): 1022-1028.
- [7] 纪静, 谢开贵, 曹侃, 等. 配电变电站典型接线的可靠性非同调元件辨识[J]. 重庆大学学报, 2012, 35(3): 74-79.
JI Jing, XIE Kaigui, CAO Kan, et al. Recognizing the reliability non-coherence components of distribution substation typical configuration[J]. Journal of Chongqing University, 2012, 35(3): 74-79.
- [8] 纪静. 电力系统可靠性非同调元件辨识研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2011.
JI Jing. Study on recognizing the reliability non-coherence components of power system[D]. Chongqing: Chongqing University, 2011.
- [9] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.
- [10] 郑亚强, 李华伟, 吴涛. TCSC 阻抗特性及其导通角对次同步谐振的抑制分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(16): 27-32.
ZHENG Yaqiang, LI Huawei, WU Tao. Impedance characteristics of TCSC and its conduction angle for sub-synchronous resonance mitigation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(16): 27-32.
- [11] HAO Zhenghang, YAO Zhiqing, LI Shaohua, et al. The contribution of double-fed wind farms to transient voltage and damping of power grids[J]. Tehnicki Vjesnik, 2015, 22(1): 43-49.
- [12] 张舒, 肖泽宇, 刘宏超. 多运行方式 SVG 的电压调节[J]. 电器与能效管理技术, 2014(20): 47-51.
ZHANG Shu, XIAO Zeyu, LIU Hongchao. Voltage regulation based on varied working mode of SVG[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(20): 47-51.
- [13] 祝嘉, 许启进, 楼翔, 等. 关于 SVC、SVG 类产品的无功补偿性能测试方案[J]. 电器与能效管理技术, 2014(11): 61-64.
ZHU Jia, XU Qijin, LOU Xiang, et al. Testing scheme of reactive power compensation performance for SVC, SVG[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2014(11): 61-64.
- [14] 张林, 沈钟浩, 冯丽, 等. 基于直流灵敏度法的川渝电网输电能力受限成因研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 67-73.
ZHANG Lin, SHEN Zhonghao, FENG Li, et al. Study on causes of limited transmission capacity of Sichuan-Chongqing power grid based on DC-sensitivity[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 67-73.
- [15] 宋晓通, 戴拥民, 武守远, 等. 提升台远-塔中-且末通道输送能力的综合方案[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(9): 85-90.
SONG Xiaotong, DAI Yongmin, WU Shouyuan, et al. Integrated solution for transfer capability enhancement of Taiyuan-Tazhong-Qiemo channel[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2014, 26(9): 85-90.
- [16] 王成山, 陈光远, 魏炜, 等. 考虑负荷及发电机出力不确定性的 TCSC 选址与定容[J]. 继电器, 2006, 34(7): 51-55.
WANG Chengshan, CHEN Guangyuan, WEI Wei, et al. Optimal location and parameters of TCSC considering load and generator output uncertainties[J]. Relay, 2006, 34(7): 51-55.
- [17] 潘淑杰, 马平, 蔡兴国, 等. 用于提高输电能力的 TCSC 选址和定容方案[J]. 电网技术, 2009, 33(4): 65-70.
PAN Shujie, MA Ping, CAI Xingguo, et al. Selection scheme for installation site and optimal capacity of TCSC to increase transfer capability[J]. Power System Technology, 2009, 33(4): 65-70.

- [18] 王延鹏, 蔡兴国. 确定 TCSC 安装位置和安装容量的方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2010, 22(2): 48-53.
WANG Yanpeng, CAI Xingguo. Approach to determine the optimal location and parameter setting of TCSC[J]. Proceeding of the CSU-EPSCA, 2010, 22(2): 48-53.
- [19] 张健, 冀瑞芳, 李国庆. TCSC 优化配置提高可用输电能力的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 23-28.
ZHANG Jian, JI Ruifang, LI Guoqing. Study of enhancement of available transfer capability using TCSC optimal allocation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 23-28.
- [20] LI Shenghu, DAI Chaobo, ZHU Ying. Short-term reliability equivalence algorithm for flexible transmission equipment[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2012, 43(1): 427-432.
- [21] 赵渊, 董力, 谢开贵. FACTS 元件的可靠性成本/效益分析及其优化配置模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1): 107-114.
ZHAO Yuan, DONG Li, XIE Kaigui. Research on optimal placement of FACTS devices based on reliability cost/benefits analysis[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1): 107-114.
- [22] 赵渊. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析及其校正措施模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2004.
ZHAO Yuan. Research on reliability assessment of bulk power systems based on sensitivity analysis and a corrective model[D]. Chongqing: Chongqing University, 2004.
- [23] 杨晓崇. 含柔性交流输电设备的电网可靠性评估及优化配置模型研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
YANG Xiaochong. Power grid reliability evaluation incorporating FACTS and optimal allocation model research[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [24] 赵渊, 邱玉良, 宿晓岚. 含 TCSC 的电网运行风险评估模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(7): 50-58.
ZHAO Yuan, QIU Yuliang, SU Xiaolan. Operating risk assessment model of power grid with TCSC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 50-58.
- [25] 程琳, 孙元章, 杨琨, 等. 可控串补接入电力系统的运行可靠性研究[J]. 电网技术, 2015, 39(3): 751-756.
CHENG Lin, SUN Yuanzhang, YANG Kun, et al. Operating reliability research of transmission line considering TCSC[J]. Power System Technology, 2015, 39(3): 751-756.
- [26] BILLINTON R, FOTUHI-FIRUZABAD M, FARIED S O. Power system reliability enhancement using a thyristor controlled series capacitor[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 369-374.
- [27] HUANG G M, LI Yishan. Impact of thyristor controlled series capacitor on bulk power system reliability[C] // Power Engineering Society Summer Meeting, Chicago, USA, July 21-25, 2002: 975-980.

收稿日期: 2015-08-18; 修回日期: 2015-10-22

作者简介:

李生虎(1974-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性、风电系统分析与控制、柔性输电技术在电力系统中的应用; E-mail: shenghuli@hfut.edu.cn

于丽萍(1991-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: yu_liping_miss@126.com

董王朝(1993-), 男, 博士研究生, 研究方向为风电系统可靠性与优化。

(编辑 魏小丽)