

含 UPFC 南京西环电网系统可靠性评估研究

李 琥¹, 刘国静¹, 朱 磊¹, 胡晓燕¹, 谈 健¹, 朱鑫要²

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:为量化评估统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)装置对电网运行可靠性的影响,以 200 kV 南京西环网 UPFC 工程为研究对象,分析了含 UPFC 系统可靠性评估的方法和流程。首先基于 UPFC 子系统划分,建立了 UPFC 各子系统无备用元件和有备用元件情况下的可靠性模型,在此基础上获得 UPFC 系统两状态模型,由此提高了传统电力系统可靠性评估方法在含 UPFC 系统的适用性。最后,结合南京西环网实例,重点分析了装设 UPFC、新建线路、采用倍容导线等不同方案以及 UPFC 不同安装位置对电网可靠性的影响,分析结果可为后续柔性输电装置在江苏应用提供借鉴。

关键词:统一潮流控制器; 可靠性; 蒙特卡洛模拟; 南京西环网

中图分类号: TM711

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2018)01-0026-06

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)是当前灵活交流输电技术发展的前沿产品,它能够同时调控系统的电压、阻抗及功角等参数,具有灵活控制潮流、提高电网传输能力及改善系统稳定性等多种功能^[1-2]。2015 年底,为解决南京 220 kV 西环网中关键输电断面输电能力不足、新的输电通道难以建设等实际问题,国网江苏省电力有限公司建成投运了世界首个基于模块化多电平(modular multilevel converter, MMC)技术的 220 kV UPFC 工程^[3-4]。南京 220 kV 西环网 UPFC 工程投运一年多来,多次调整控制策略,缓解了南京西环网输电断面的重载问题,发挥了巨大的工程效用。

然而,目前关于南京西环网 UPFC 工程的研究中,更多的是从工程建设、运行分析等方面展开研究^[5-9],对 UPFC 自身可靠性,尤其是对 UPFC 投运后对电网整体可靠性的影响分析还相对较少。文献[10]将 UPFC 三状态、四状态可靠性模型扩展到九状态,能够考虑 UPFC 降额运行、单换流器运行等运行方式,在此基础上建立 UPFC 灵敏度解析模型,能够更精确地获取 UPFC 停运概率。文献[11]分析了 UPFC 随机故障和不同的控制策略对系统失稳概率指标的影响,并基于非序贯蒙特卡洛模拟方法建立了分析流程,以修正 EPRI-36 节点系统为例进行仿真计算。文献[12]考虑了母线电压、线路潮流对 UPFC 停运概率的影响,在此基础上建立了含

UPFC 的负荷削减模型,可通过事故后的 UPFC 控制降低系统切负荷概率指标。为保障 UPFC 的可靠运行,实际中一般对其重要的子系统需配置备品、备件以减少故障停运时间,现有研究在 UPFC 可靠性建模中对备用元件的考虑尚不够充分。

随着后续电网发展,江苏电网必然会采用更多的柔性输电装置。然而,这些柔性输电装置的可靠性将不可避免的对江苏电网的可靠性带来影响。因此,有必要以南京西环网 220 kV UPFC 为研究对象,开展可靠性分析研究,为后续柔性输电装置在江苏应用提供借鉴分析。

1 南京 220 kV UPFC 工程概况

南京西环网主要由 500 kV 龙王山变电站和 500 kV 东善桥变电站从南北两端供电,区域内带有华能南京电厂、华润南京电厂等电源。西环网的供电范围包括主城西部、河西新城、奥体新城等,集聚了政府机关、高等院校等较多重要负荷。南京西环网地处南京中心城区,无论是新建输电通道还是对现有通道实施增容改造,均存在投资巨大、实施难度大的问题。为解决南京西环网潮流分布不均问题,2015 年,国网江苏省电力有限公司建成了 220 kV UPFC 示范工程。该工程在 220 kV 晓庄—铁北双线上装设 2×60 MV·A 串联换流器,在 220 kV 燕子矶变电站 35 kV 母线上装设 1×60 MV·A 并联换流器,如图 1 所示。

2 含 UPFC 可靠性评估

2.1 UPFC 子系统可靠性模型

按照功能和连接关系,UPFC 可划分为 4 个子

收稿日期:2017-09-05;修回日期:2017-10-08

基金项目:国家自然科学基金青年基金资助项目(51607092)

$$A = \begin{bmatrix} -\lambda - \mu & \lambda & 0 & \mu & 0 \\ 0 & -2\mu & 2\mu & 0 & 0 \\ \gamma & 0 & -\gamma - \lambda & 0 & \lambda \\ 0 & 0 & \lambda & -\lambda & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2\gamma & -2\gamma \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\lambda_{eq} = \frac{p_1 \times \lambda + p_2 \times \lambda}{p_1 + p_2} \quad (7)$$

$$\mu_{eq} = \frac{p_4 \times \gamma + p_5 \times 2\gamma}{p_3 + p_4 + p_5} \quad (8)$$

$$\gamma_{eq} = \frac{8760}{\mu_{eq}} \quad (9)$$

2.2 UPFC 可靠性模型

各个子系统按照上文所述方法建立两状态模型,各个子系统都对整个装置的正常运行有着重要的影响,任意子模块故障,系统都要退出运行状态,因此整个装置的可靠性评估模型可以看作是各个子系统的可靠性评估模型串联而成,得到整个装置的模型,状态空间图如图4所示。图中 λ_{eqi} 和 μ_{eqi} 分别是各个子系统的等效故障率和等效修复率。

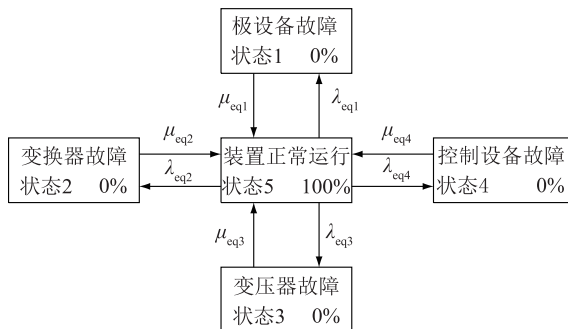


图4 UPFC 状态空间转移

Fig.4 UPFC state transition diagram

按照元件串联的关系,用串联等值公式可以求得整个UPFC的两状态模型和对应的可靠性指标。

$$\lambda_{UPFC} = \sum_{i=1}^4 \lambda_{eqi} \quad (10)$$

$$\gamma_{UPFC} = \frac{1}{\lambda_{UPFC}} \sum_{i=1}^4 \lambda_{eqi} r_i \quad (11)$$

$$\mu_{UPFC} = \frac{8760}{r_{UPFC}} \quad (12)$$

式中: λ_{UPFC} 是装置的等效故障率; γ_{UPFC} 是每次故障平均修复时间; μ_{UPFC} 是等效修复率。

2.3 含UPFC系统可靠性评估基本流程

含UPFC电网可靠性计算流程与常规电网可靠性计算总流程基本一致^[14-15],主要包括以下4个步骤:

(1) 建立元件可靠性模型。UPFC可靠性建模

方法如2.1-2.3节所述,最终可获得UPFC系统两状态的等效可靠性参数。系统中其它的发电机组、输电线路、变压器等元件采用常规两状态模型。

(2) 系统运行状态随机模拟抽样。文中采用蒙特卡洛模拟法对系统运行状态进行随机抽样^[16-17]。

(3) 故障状态分析。对于出现元件故障的抽样状态,若出现支路潮流越限,则考虑通过发电机组功率调整或UPFC参数调整的方式消除支路潮流越限。文中采用的启发式调整过程如图5所示。

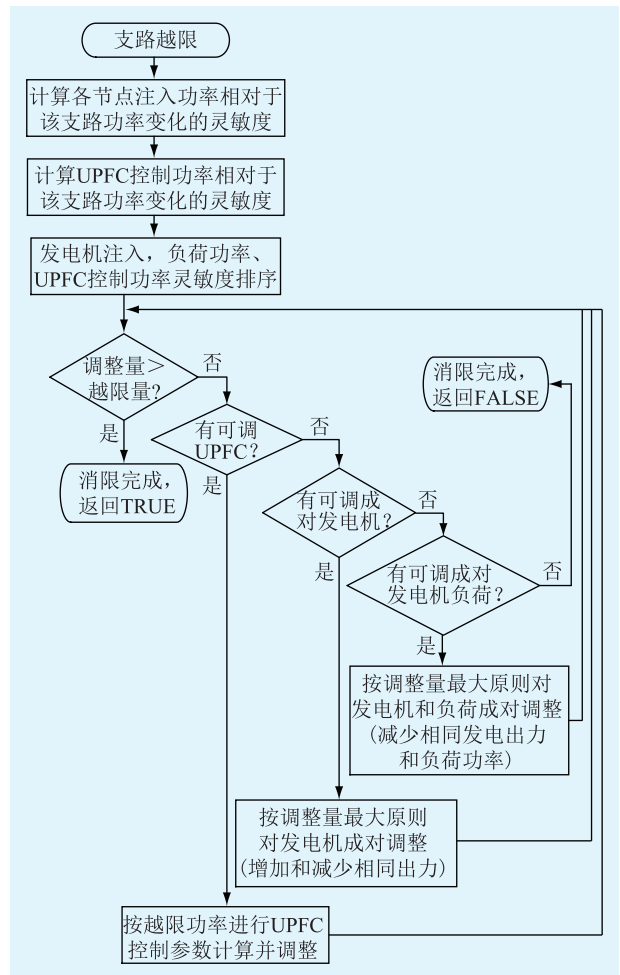


图5 支路越限调整流程

Fig.5 Adjustment process of line power

(4) 可靠性指标计算。文中计算了切负荷频率、切负荷持续时间、电量不足期望值等18项可靠性指标。

3 实例分析

3.1 可靠性参数计算

发电机、线路、主变的可靠性参数基于中电联可靠性中心发布参数。发电机组非计划停运次数为0.34次/(台·a),停运时间为24.44h/(台·a)。线路、主变可靠性参数如表1所示。

表 1 线路和主变可靠性参数

Tab. 1 Line and transformer reliability data

类别	修复时间 /(h·次 ⁻¹)	检修率 /[次·(km·a ⁻¹)]	检修时间 /(h·次 ⁻¹)	修复时间 /(h·次 ⁻¹)
线路	0.087 5	0.114 98	0.729	46.147
主变	0.199 4	0.708 58	97.899	88.901

UPFC 装置中主要组合元件的可靠性原始参数参照柔性直流输电系统可靠性参数^[18],具体如表 2 所示。

表 2 UPFC 子系统可靠性参数

Tab. 2 UPFC reliability data

序号	组合元件	故障率/ (次·a)	修复率/ (次·a)	安装率/ (次·a)
1	换流阀	0.031 3	486.667	11 680
2	换流变压器	0.006 6	350.400	7300
3	控制及保护	1.309 5	1 095.000	10 950
4	直流电容器 等极设备	0.050 0	758.442	4380

按照前文所述子模块可靠性建模方法分别计算各个子模块的可靠性参数,再按状态合并方法得到各个子模块的两状态模型和对应的等效故障率、修复率。在元件是否有备用元件不同情况下的 UPFC 可靠性参数计算结果如表 3 所示。

表 3 UPFC 可靠性参数计算结果

Tab. 3 Calculation results of UPFC reliability parameters

情况	故障率/ (次·a)	装置修复时间/ [h·(次·a) ⁻¹]	装置能量 可用率
4 个子系统 均带备用	1.435 3	0.808 076 2	0.999 867 6
换流变压器 不带备用	3.422	15.646 5	0.993 887 75
换流变压器和 极设备不带备用	4.372	15.324 767 64	0.992 351 64

3.2 不同规划方案可靠性对比分析

为下列 3 种规划方案进行对比分析,验证 UPFC 对电网可靠性的影响。

(1) 新建线路方案。将 220 kV 华能南京—晓庄南侧线路单开环入 220 kV 码头,需建设电缆线路 2×9 km,投资约 9 亿元。

(2) 线路倍容方案。将苏下关—苏晓庄和苏晓庄—苏中央线路约扩容,由原先 750 A 扩容到 1500 A,需更换导线约 30 km,但线路附近有高架路、居民小区、高层商住楼、京沪电气化铁路、加油站等设施,方案难以实施。

(3) 装设 UPFC 方案。本节计算选用 UPFC 可

靠性参数:故障率=4.372 次/a,修复时间=15.324 8 h/(次·a)。3 种情况下的可靠性指标计算结果如表 4 所示。

表 4 可靠性指标计算结果

Tab. 4 Calculation result of power system reliability

指标	新建线路 方案	线路倍容 方案	装设 UPFC 方案
切负荷概率	0.004 934	0.005 39	0.006 655
切负荷频率/ (次·a ⁻¹)	2.880 288	3.008 184	4.473 732
切负荷持续时间/ (h·a ⁻¹)	43.225 07	47.218 9	58.296 28
每次切负荷持续 时间/(h·次 ⁻¹)	15.007 2	15.696 81	13.030 79
负荷切除期望值/ (MW·a ⁻¹)	32.813 65	29.997 36	46.546 67

通过表 4 可知,新建线路方案、线路倍容方案可靠性均略高于线路倍容方案。这主要是由于新建线路方案、线路倍容方案从根本上提升了电网传输能力,因此可靠性略高。

然而,新建线路方案总投资远高于 UPFC 方案,同时其经济成本过高,且更换倍容导线方案由于政处原因,难以实施。因此,综合考虑工程经济性与可行性,南京西环网装设 UPFC 仍是合适方案。

3.3 UPFC 安装位置不同可靠性影响分析

UPFC 不同的安装位置也会对可靠性带来一定影响,此处重点分析了 UPFC 分别安装在铁北—晓庄双回、晓庄—中央与晓庄—下关线路、尧化—东阳双回双回不同位置下对电网可靠性的影响。

表 5 UPFC 不同安装位置下可靠性指标计算结果

Tab. 5 Reliability calculation results under different installation positions of UPFC

指标	铁北—晓庄 双回	晓庄—中央 晓庄—下关	尧化—东阳 双回
最大故障设备重数	3	3	3
切负荷概率	0.006 655	0.012 584	0.030 651
切负荷频率/ (次·a ⁻¹)	4.473 732	7.200 72	19.747 67
切负荷持续时间/ (h·a ⁻¹)	58.296 28	110.231 7	268.502 2
每次切负荷持续 时间/(h·次 ⁻¹)	13.030 79	15.308 43	13.596 65
负荷切除期望值/ (MW·a ⁻¹)	46.546 67	41.640 92	77.328 17

通过表 5 可知,UPFC 不同安装位置对可靠性影响较大,UPFC 安装在铁北—双回线上可靠性比

在晓庄—中央、晓庄—下关双线上可靠性下降50%;如果安装在尧化—东阳双线上,可靠性下降约500%。

4 结语

文中针对含 UPFC 南京西环电网系统可靠性进行研究,得到以下结论。

(1) 在 UPFC 可靠性建模中考虑有无备用元件的影响,能够使 UPFC 模型更贴近实际,提高分析结果的准确性;

(2) 在故障状态分析过程中,通过启发式方法及 UPFC 参数调整消除线路潮流越限的作用,具有较高的计算效率;

(3) 在南京西环网系统,装设 UPFC 方案的可靠性水平略低于新建线路方案和线路倍容方案,但考虑经济性因素后,装设 UPFC 方案最为合适;

(4) UPFC 不同安装位置对可靠性影响较大,在选择安装位置时需经详细比较确定。

参考文献:

- [1] GYUGYI L. Unified power-flow control concept for flexible AC transmission systems[J]. IEEE Proceedings, 1992, 139(4): 323-331.
- [2] GYUGYI L, SCHAUDER C D, WILLIAMS S L, et al. The unified power flow controller; a new approach to power transmission control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 1085-1097.
- [3] 窦飞. 统一潮流控制器在南京 220 kV 西环网的应用研究[D]. 华北电力大学, 2015.
- [4] 杨晓峰, 林智钦, 郑琼林, 等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-14.
- [5] 蔡晖, 祁万春, 黄俊辉, 等. 统一潮流控制器在南京西环网的应用[J]. 电力建设, 2015, 36(8): 73-78.
- [6] 林金娇, 李鹏, 孔祥平, 等. 南京西环网 UPFC 保护系统及配合策略[J]. 电力工程技术, 2015, 34(6): 56-60.
- [7] 王莹, 甄宏宁, 常宝立, 等. UPFC 在南京西环网中的应用需求分析[J]. 电力工程技术, 2016, 35(1): 53-56.
- [8] 陈刚, 李鹏, 袁宇波. MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(7): 121-127.
- [9] 祁万春, 杨林, 宋鹏程, 等. 南京西环网 UPFC 示范工程系统级控制策略研究[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 92-96.
- [10] 李生虎, 马燕如, 董王朝. UPFC 扩展状态空间模型和基于矩阵描述的可靠性灵敏度解析算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(增刊): 44-51.
- [11] 丁明, 汤海雁, 吴红斌. 含 UPFC 的电力系统概率稳定分析[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(5): 1-4.
- [12] 李立, 鲁宗相, 邱阿瑞. 基于新负荷削减模型的 UPFC 优化配置[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(13): 6-10.
- [13] 王勇, 韩学山, 丁颖, 等. 基于马尔科夫链的电力系统运行可靠性快速评估[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 405-410.
- [14] 张巍峰, 车延博, 刘阳升. 电力系统可靠性评估中的改进拉丁超立方抽样方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 52-57.
- [15] 暴英凯, 王越, 唐俊熙, 等. 序贯蒙特卡洛方法在电力系统可靠性评估中的应用差异分析[J]. 电网技术, 2014, 38(5): 1189-1195.
- [16] 葛少云, 王浩鸣, 徐栋. 基于蒙特卡洛模拟的分布式风

- 光蓄发电系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2012, 36(4):39-44.
- GE Shaoyun, WANG Haoming, XU Li. Reliability of evaluation of distributed generating system including wind energy, solar energy and battery storage using Monte Carlo simulation[J]. Power System Technology, 2012, 36(4):39-44.
- [17] 麻常辉, 梁 军, 杨永军, 等. 基于蒙特卡罗模拟法的输电网络灵活规划[J]. 电网技术, 2009, 33(4):99-102.
- MA Changhui, LIANG Jun, YANG Yongjun, et al. Monte Carlo simulation based flexible planning of power transmission network[J]. Power System Technology, 2009, 33(4):99-102.
- [18] 丁 明, 毕 锐, 王京景. 基于 FD 法和模型组合的柔性直流输电可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36

(21):33-37.

DING Ming, BI Rui, WANG Jingjing. FD method and combined model for reliability assessment of HVDC flexible [J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(21):33-37.

作者简介:



李 琥

李 琥(1979—),男,硕士,高级工程师,从事电网规划分析工作(E-mail:tigerli110@163.com);

刘国静(1988—),男,博士,研究方向为综合能源规划(E-mail:liu.guojing@qq.com);

朱 磊(1989—),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析工作。

Study on System Reliability Evaluation of Nanjing West Loop Power Network with UPFC

LI Hu¹, LIU Guojing¹, ZHU Lei¹, HU XiaoYan¹, TAN Jian¹, ZHU Xinyao²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the influence of UPFC device on the operation reliability of power grid, this paper takes UPFC project of 200 kV Nanjing West Ring Network as the example, and the method and process of the reliability evaluation of the system with UPFC is analyzed. First, based on UPFC subsystem division, the reliability model of each subsystem with no spare components and spare components is established. Based on this, the two-state model of UPFC system is obtained. Finally, combined with the case of Nanjing West Ring Network, it was mainly analyzed the influence of different schemes such as UPFC, new line and double capacity wires and different installation locations of UPFC on the reliability of power grid.

Key words: unified power flow controller; reliability; Monte Carlo simulation; styling; Nanjing western power grid

(编辑 钱 悦)