

Reliability Evaluation of UPFC for Double-Circuit Lines

Zhemin Lin¹, Qian Hu², Xun Mao¹, Xuchang Zhang¹, Binbin Li¹, Pingping Han²

¹State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei Anhui

²Anhui Key Laboratory of New Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University and Technology, Hefei Anhui

Email: LH021211@163.com

Received: Jan. 23rd, 2018; accepted: Feb. 6th, 2018; published: Feb. 23rd, 2018

Abstract

The unified power flow controller (UPFC) is an important third generation of flexible AC transmission equipment which can comprehensively optimize the power flow and influence the reliability of power grid. Considering the traditional 3-state model of UPFC ignores the independent operation of the converters, while the 4-state model does not take account of the practical application structure of UPFC, an optimized four state model is proposed. Taking into account the three converter mutual backup structure, and the principle of priority to ensure the realization of static synchronous series compensator (SSSC) function while internal fault occurs, the model improves the system utilization rate of UPFC as well as UPFC's reliability. The ability of UPFC to achieve various states is calculated by the state space method and the hierarchical equivalence theory. The influence of UPFC four operation states on the system reliability is verified in the example of Hefei Southern sub area power grid.

Keywords

The Unified Power Flow Controller (UPFC), Reliability, Optimized Four State Model, Hierarchical Equivalence, State Space

适用双回线路的UPFC可靠性评估

林哲敏¹, 胡 骞², 毛 荀¹, 张旭昶¹, 李宾宾¹, 韩平平²

¹国网安徽省电力公司电力科学研究院, 安徽 合肥

²合肥工业大学, 安徽省新能源利用与节能重点实验室, 安徽 合肥

Email: LH021211@163.com

收稿日期: 2018年1月23日; 录用日期: 2018年2月6日; 发布日期: 2018年2月23日

摘要

统一潮流控制器(UPFC)是重要的第三代柔性交流输电设备,可以全面的优化电力系统潮流,影响电网可靠性。考虑到传统UPFC三状态可靠性模型未顾及换流器单独运行的状态、四状态模型未考虑UPFC的实际应用结构,提出了一种优化的四状态模型。该模型考虑了双回UPFC三台换流器互为备用的结构,以及内部故障时优先保障实现静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)功能的原则,提高了系统对UPFC的利用率以及UPFC的可靠性。利用状态空间法和分层等值思想计算UPFC实现各个状态的能力,并在合肥南部分区电网实例中验证了UPFC四种运行状态对系统可靠性的影响。

关键词

统一潮流控制器, 可靠性, 优化四状态模型, 分层等值, 状态空间

Copyright © 2018 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

现代电力系统已经发展成为一个交直流互联,新能源和传统能源互补的大规模复杂电网,区域内发电和负荷分布不均衡、潮流分布不均匀问题日益突出。传统电网控制手段缺乏,无法适应复杂的电网新环境。电力电子化电力系统的产物-灵活交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)应势而生。FACTS 具有控制电网潮流、改善系统稳定性以及提高输电能力的强大功能,并且其控制技术响应速度快、灵活全面,明显优于电力系统现有的潮流和稳定控制措施[1] [2]。

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)作为功能全面的 FACTS 装置,综合了静止同步串联补偿器(SSSC)和静止同步补偿器(STATCOM)的控制手段,能够快速灵活的对电力系统进行串并联补偿和电压调节[3] [4]。UPFC 的应用也给电力系统可靠性评估引入新的问题:UPFC 的可靠性建模以及UPFC 随机故障对传统电网可靠性的影响,对UPFC 可靠性研究有利于未来电网的安全可靠运行。

UPFC 的可靠性模型主要有两状态模型、三状态模型、四状态模型和综合后两种的九状态模型。文献[5] [6]提出了UPFC 的两状态模型,分析了其对电网的影响,文献[7]在此基础上将UPFC 的两端功率注入模型加入到传统的基于交流潮流的最优负荷削减模型中,提出了一种UPFC 的优化配置方法。三状态模型采用了频率-持续时间法,考虑了UPFC 的降额状态。但它没有考虑到UPFC 串联侧和并联侧的独立运行方式[8]。四状态模型将UPFC 运行状态分为正常、串联侧单独工作的SCCC模式、并联侧单独工作的STATCOM模式和停运四种状态,但是其忽略了换流器的降额状态[9] [10]。综合考虑三状态和四状态模型,文献[11]提出了一种九状态模型。它充分考虑了串、并联侧换流器的单独运行和降额状态,利用矩阵形式F&D算法,建立了UPFC 可靠性灵敏度解析模型。

UPFC 一般应用于110 kV以上系统,而我国110 kV及以上线路多采用双回接线结构,需要一种可靠、经济、灵活的双回UPFC结构来优化控制系统潮流[12] [13]。传统UPFC的可靠性建模均只考虑单回结构,针对UPFC的实际应用情况,本文提出一种适用UPFC优化双回结构的可靠性模型。重新划分子系统,以SSSC模式优先运行原则为基础,运用马尔可夫状态空间法[14]和分层等值思想[15] [16]建立一个优化四状态可靠性模型。并基于该模型在Digsilent中分析了UPFC各状态对电力系统的可靠性影响。

2. UPFC 结构功能

可靠、经济、灵活的双回 UPFC 系统优化结构如图 1 所示。正常情况下，一组换流器通过并联变压器 T1 接入母线，独立运行时仅实现 STATCOM 功能，两组换流器通过串联变压器 T2、T3 接入到双回线路中，独立运行时仅实现 SSSC 功能。三组换流器互为备用，当一组或两组换流器故障时，通过转换开关操作，仍可以实现 UPFC 部分功能。并联侧换流器采用电压 - 无功控制，串联侧换流器采用 P-Q 控制，可以同时补偿有功、无功和电压，实现四象限运行。

3. UPFC 可靠性建模

为防止状态空间法计算过程中的维数灾难，将 UPFC 重新划分子系统，分别建立各个子系统的状态空间图，利用分层等值思想，形成整个系统的状态空间。子系统 S1 为三组互为备用的换流器，子系统 S2 为串联侧变压器，子系统 S3 为并联侧变压器，子系统 S4 包括直流侧和控制系统。

3.1. 子系统模型建立

UPFC 一般应用在 110kV 及以上的交流强电网中，对无功功率和电压控制的需求较弱，将优先保证实现 SSSC 功能。

当串联侧换流器发生故障时，先将故障换流器退出运行，然后通过转换开关将并联侧换流器转换到串联侧，此时实现 SSSC 功能，保持对系统的有功控制。

当并联侧换流器发生故障时，通过保护功能将 UPFC 并联侧退出运行，此时只要增加串联侧换流器对直流电压的控制功能，UPFC 即能保持潮流的控制功能，无需停运。

子系统 S1 的状态空间模型如图 2 所示，将三组换流器编号为 C_1 、 C_2 、 C_3 ， λ 、 μ 分别表示故障率和修复率，1、0 分别表示换流器正常和故障状态，右上角 1、 0.5^+ 、 0.5^- 、0 表示子系统 S1 满足实现 UPFC、SSSC、STATCOM、DOWN 四种功能的要求。

子系统 S1 的状态空间模型中某些状态处在同一工作模式，可以利用等值思想合并为同一状态，等值后的状态空间模型如图 3 所示。

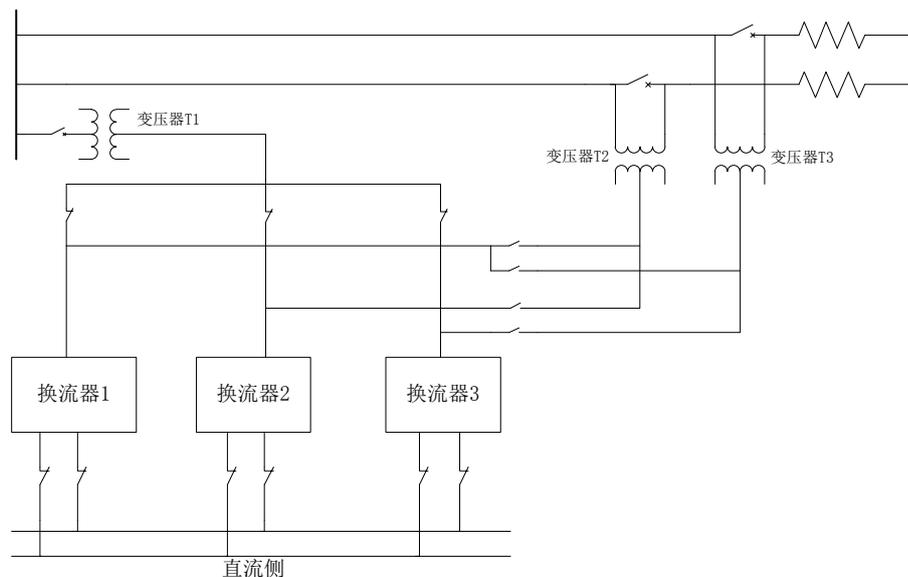


Figure 1. System structure diagram of double-circuit UPFC
图 1. 双回 UPFC 系统结构图

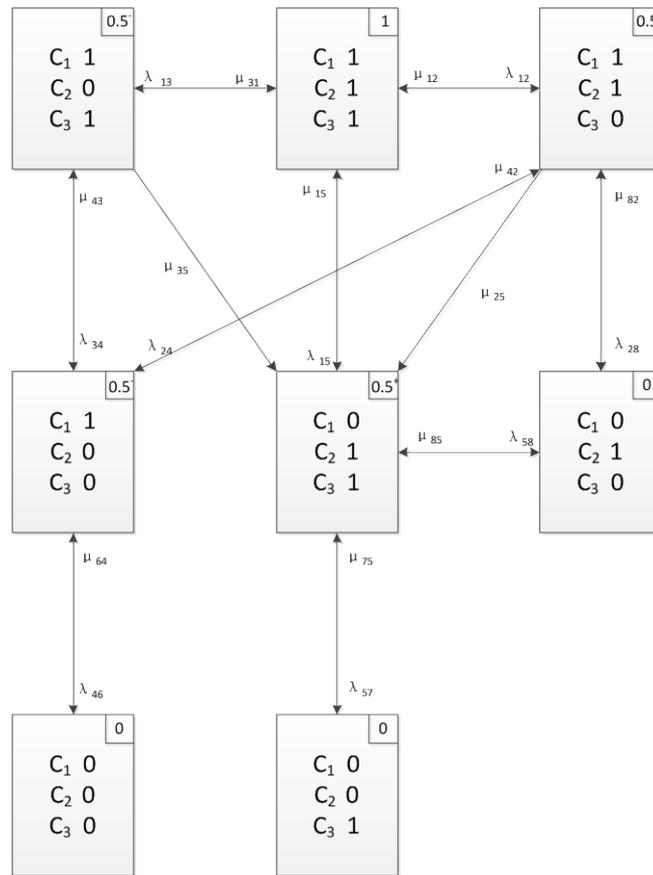


Figure 2. State-space model of subsystem S1
图 2. 子系统 S1 状态空间图

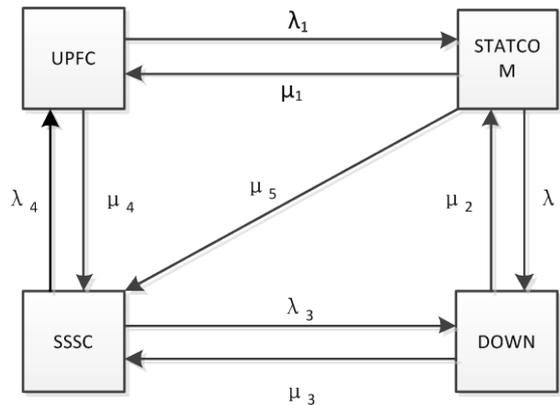


Figure 3. Equivalent state-space model of subsystem S1
图 3. 子系统 S1 等值状态空间模型

状态空间从八状态等值为四状态，设等值前状态概率 $P = (P_1, \dots, P_8)^T$ ，状态转移率矩阵 $A_{ij} = [a_{ij}]$ ，等值后状态概率 $P' = (P'_1, \dots, P'_4)^T$ ，状态转移率矩阵为 $A'_{ij} = [a'_{ij}]$ 。等值前概率 P 由式(1)和(2)求得：

$$PA = P \tag{1}$$

$$\sum P_i = 1 \tag{2}$$

状态转移频率由式(3)得:

$$f_{ij} = a_{ij}P_i \quad (3)$$

再由式(4)求得等值后的状态转移频率 f'_{ij} :

$$f'_{ij} = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} f_{ij} \quad (4)$$

此时, 等值后的状态间转移率 a'_{ij} 可由式(5)和式(6)最终求得,

$$P'_i = \sum_{i \in I} P_i \quad (5)$$

$$f'_{ij} = a'_{ij}P'_i \quad (6)$$

3.2. UPFC 状态空间模型

换流器系统 S1 等值后有四种状态: 正常(1), 并联侧 STATCOM 模式(0.5⁺), 串联侧 SSSC 模式(0.5⁻), 停运(0)。子系统 S2、S3、S4 均只有工作(1)和故障(0)两种状态。整合各个子系统模型可以得到 UPFC 整体的状态空间模型, 如图 4 所示。

合并停运状态, 得到 UPFC 的具体运行状态如表 1 所示。

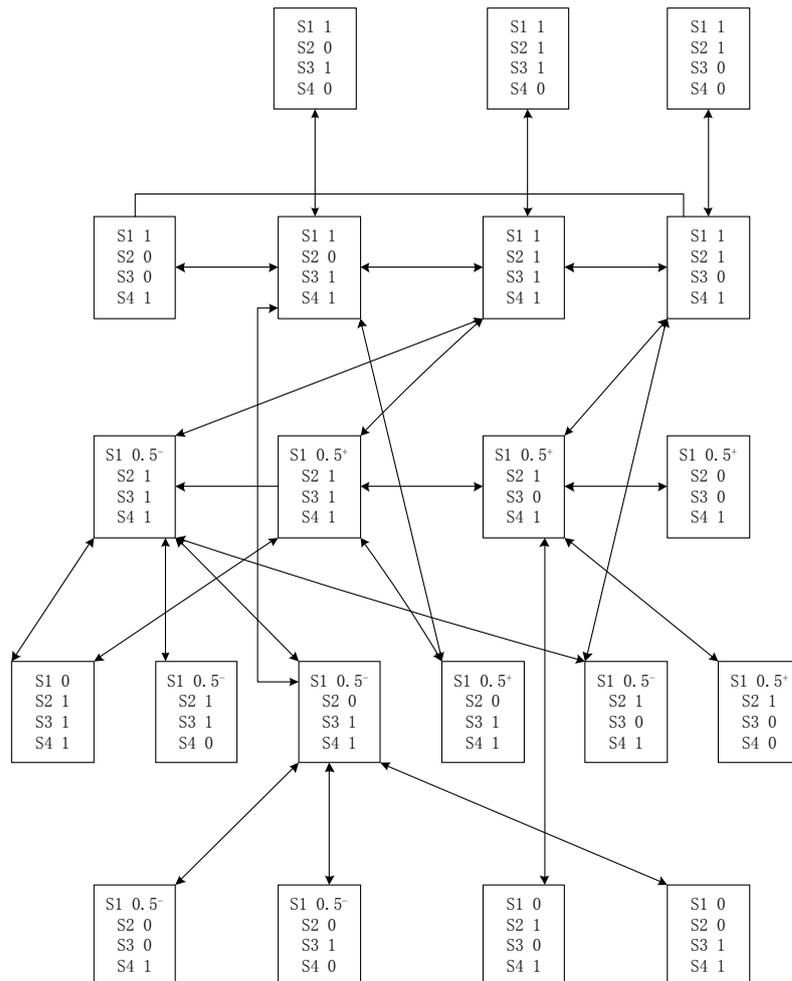


Figure 4. State-space model of UPFC
图 4. UPFC 状态空间模型

Table 1. Table of UPFC operation state
表 1. UPFC 运行状态表

序号	S1	S2	S3	S4	状态
1	1	1	1	1	UPFC
2	1	1	0	1	SSSC
3	1	0	1	1	STATCOM
4	0.5 ⁻	1	1	1	STATCOM
5	0.5 ⁺	1	1	1	SSSC
6	0.5 ⁺	1	0	1	SSSC
7	0.5 ⁻	0	1	1	STATCOM
8					停运

4. 计及 UPFC 的电网可靠性评估

UPFC 对系统可靠性影响的研究需要考虑 UPFC 各个运行状态以及分别计算各个状态对系统的影响。可靠性评估的一般流程为:

- 1) 电网可靠性建模;
- 2) 选取系统状态;
- 3) 系统状态影响分析;
- 4) 计算可靠性指标。

可靠性建模指元件的可靠性数据模型和负荷模型。系统状态选取的方法主要有状态枚举法和蒙特卡洛模拟法, 评估 UPFC 对系统可靠性影响时采用的是状态枚举法, 枚举法计算速度快、精度高。状态枚举法的基本思路是逐一枚举出所有可能的系统状态, 而每一个系统状态都是由所有正常运行元件和故障元件状态组成的, 系统状态概率 $P_{(s)}$ 为:

$$P_{(s)} = \prod_{i=1}^n Q_i \prod_{i=1}^{m-n} P_i \quad (7)$$

式中, m 为系统的元件数, P_i 和 Q_i 分别为系统中第 i 个元件工作和失效的概率, n 和 $m-n$ 分别为系统状态 s 中失效和未失效的元件个数。

系统状态影响分析: 判断是否失效, 若失效则进行可能的系统校正, 如发电机出力调整、变压器分接头调整、UPFC 参数调整以及负荷削减。

本文用到的可靠性指标包括系统平均停电频率 SAIFI、系统平均停电时间 SAIDI 和缺供电量 ENS [17], 简化的数学公式如下:

1) 系统平均停电频率指标(SAIFI), 单位为[1/C/yr], 表示在计算周期内, 一个用户平均多久经历一次持续停电;

$$SAIFI = \frac{\sum \lambda_i \cdot C_i}{\sum C_i} \quad (8)$$

2) 系统平均停电时间指标[SAIDI], 单位为[h/C/yr], 表示在计算周期中用户的平均停电持续时间, 通常用停电的用户分钟或者用户小时衡量;

$$SAIDI = \frac{\sum U_i \cdot C_i}{\sum C_i} \quad (9)$$

3) 缺供电量(ENS), 单位为[MWh/yr], 表示对于所用用户来说平均每年未提供的电量;

$$ENS = \sum (P_{i1} - P_{i2}) \cdot U_i \quad (10)$$

λ_i 表示负荷点 i 的停电频率, C_i 表示负荷点 i 的用户数, U_i 表示负荷点 i 的平均停电时间, P_{i1} 表示负荷点原有的负荷值, P_{i2} 表示负荷削减后负荷点 i 的负荷值。

UPFC 接入系统后可以优化系统潮流, 改善线路轻重载并存的情况, 降低系统的停电频率, 减少缺供电量, 提高系统的可靠性水平。

5. 算例

本文基于 DigSilent 仿真平台, 搭建了含 UPFC 的合肥南部分区电网仿真模型。通过调整 UPFC 的拓扑结构, 实现了 UPFC 的各个运行状态, 并利用 DigSilent 内部编程语言 DPL, 计算各个状态对系统的影响。

合肥南部分区电网的部分系统结构图如图 5 所示, 南部分区电网是合肥 220 kV 主干电网, 区域内负荷和电源分布不合理, 线路规划陈旧, 潮流分布严重不均。其中, 肥西-大学城线单回线路有功容量为 450 MW。正常运行时, 单回线路上的有功为 350 MW, 发生 N-1 故障时, 另一回线路潮流达到有功容量的 143%, 严重越限, 将造成停运, 削减部分负荷后才可以恢复单回供电。在肥西-大学城线加装双回 UPFC 后, 此时若发生 N-1 故障, 可以通过调节 UPFC 的控制参数, 使另一回线路潮流在有功极限以内。

合肥南部分区电网设备可靠性数据模型如表 2 所示:

接入的 UPFC 参数为: 换流器额定容量为 3*70 MVA; 额定直流电压 25 kV; 额定直流电流 1200 A; 并联侧变压器容量为 150 MVA, 串联侧变压器容量为 2*80 MVA。根据状态空间图计算出的 UPFC 各状态概率如表 3 所示:

调整 UPFC 的拓扑结构使 UPFC 运行在正常、STATCOM、SSSC 和停运四种状态, 分别计算四种状态对系统可靠性的影响, 仿真计算时认为 UPFC 各个子系统完全可靠, 得到 UPFC 运行于各个状态时的系统可靠性指标如表 4 所示。

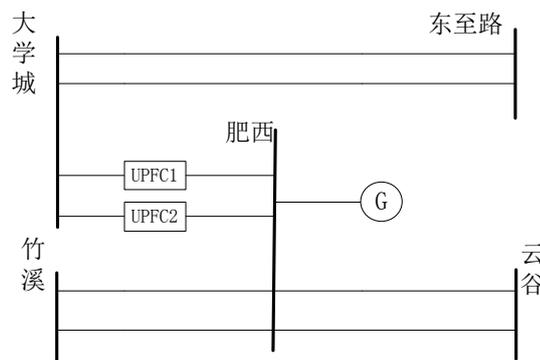


Figure 5. Hefei Southern sub area power grid
图 5. 合肥南部分区电网

Table 2. Reliability data of equipment
表 2. 设备可靠性数据表

元件	故障率	修复率(yr)
发电机	0.3/yr	122
母线	0.013/yr	438
线路	0.1/km-yr	876

Table 3. State probability of UPFC
表 3. UPFC 状态概率表

状态	UPFC	SSSC	STATCOM	DOWN
概率	0.9283	0.0424	0.0269	0.0025

Table 4. Reliability index
表 4. 可靠性指标

状态	UPFC	SSSC	STATCOM	DOWN
SAIFI (1/C/a)	0.037641	0.038014	0.040567	0.041343
SAIDI (h/C/a)	0.615	0.643	0.712	0.827
ENS (MWh/a)	1586	1651	2230	2970

计算结果显示接入 UPFC 后系统故障率降低 8.9%，系统缺供电量 ENS 降低了 46%。这是因为 UPFC 接入在改善系统潮流降低故障率的同时，还减少了某些故障情况下的负荷削减量。UPFC 运行在 SSSC 和 STATCOM 状态时也可以在一定程度上提高系统的可靠性，且由于本文中将 UPFC 应用在 220 kV 强电网中，对有功调节需求高于无功需求，UPFC 运行在 SSSC 状态的系统可靠性提高效果要优于运行在 STATCOM 状态时。这也验证了 UPFC 可靠性模型中换流器故障时优先运行 SSSC 状态的原则。

6. 结论

本文建立了 UPFC 可靠性模型并在合肥电网实例中进行了验证，得到如下结论：

- 1) 本文针对 UPFC 基于实际应用情况的双回结构，提出了 UPFC 的优化四状态可靠性模型。运用马尔可夫状态空间法并结合分层等值思想，量化 UPFC 实现各种状态的能力。
- 2) 实例结果表明 UPFC 接入可以降低故障概率，减少负荷削减量，明显提高系统可靠性水平。
- 3) 与已有的可靠性模型相比，本文所提模型更贴近实际，精度更高。
- 4) 本文所提出的双回 UPFC 可靠性评估模型可以为 UPFC 在高压系统中的实际工程应用提供技术参考。

参考文献 (References)

- [1] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器技术及控制[M]. 南京: 国网江苏省电力公司, 2015.
- [2] 李国庆, 宋莉, 李筱婧. 计及 FACTS 装置的可用输电能力计算[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 36-42.
- [3] 窦飞. 统一潮流控制器在南京 220 kV 西环网的研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [4] 凌峰, 秦健, 戴阳, 等. 南京 UPFC 工程运行方式[J]. 江苏电机工程, 2015, 34(6): 36-40.
- [5] Billinton, R., Fotuhi-Firuzabad, M., Faried, S.O., et al. (2000) Impact of Unified Power Flow Controllers on Power System Reliability. *IEEE Transactions on Power Systems*, **15**, 410-415. <https://doi.org/10.1109/59.852152>
- [6] Billinton, R. and Cui, Y. (2002) Reliability Evaluation of Composite Electric Power Systems Incorporating FACTS. *Conference on Electrical and Computer Engineering*. Canada.
- [7] 赵渊, 杨晓嵩, 谢开贵. UPFC 对电网可靠性的灵敏度分析及优化配置[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 55-60.
- [8] Aminifar, F., Fotuhi-Firuzabad, M. and Billinton, R. (2007) Extended Reliability Model of a Unified Power Flow Controller. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **1**, 896-903. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd:20070089>
- [9] Rajabi-Ghahnavieh, A., Fotuhi-Firuzabad, M. and Feuillet, R. (2008) Evaluation of UPFC Impacts on Power System Reliability. *Transmission and Distribution Conference and Exposition*, Chicago. <https://doi.org/10.1109/TDC.2008.4517173>
- [10] Hu, B., Xie, K. and Karki, R. (2010) Reliability Evaluation of Bulk Power Systems Incorporating UPFC. *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Singapore.

- [11] 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(S1): 44-51.
- [12] 凌峰, 李久虎, 田杰, 等. 适用于双回线路的统一潮流控制器系统结构优化分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 113-119.
- [13] 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.
- [14] 谢开贵, 马怀东, 胡博, 等. 基于马尔可夫状态空间图法的换流变系统可靠性评估[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 71-78.
- [15] 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]. 电力系统保护和控制, 2008, 36(21): 33-37.
- [16] 李生虎, 马燕如, 陈鹏, 等. UHVDC 系统可靠性分层等值于灵敏度解析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 10-17.
- [17] 陈育良, 李艳, 何占琦, 等. 发输电系统可靠性评估在 DIgSILENT 软件上的应用[J]. 广东电力, 2014, 27(7): 101-105.

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: sg@hanspub.org