

双回 UPFC 在安徽电网应用的可靠性分析

林哲敏¹, 胡 骞²

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院, 安徽 合肥 230062;

2. 国网安徽省电力有限公司黄山供电公司, 安徽 黄山 245000)

摘要:统一潮流控制器可以优化电网潮流分布,提高系统输电能力。实际应用时,UPFC接入后系统的可靠性水平变化是UPFC接入方案需要考虑的重要因素。针对安徽电网随着网架规模的不断扩大而出现的潮流分布不平衡问题,提出双回UPFC结构在安徽电网的应用方案,并论证其必要性;然后,建立双回UPFC元件的可靠性模型,基于蒙特卡洛模拟和最优负荷削减,编写含双回UPFC的电力系统进行可靠性评估算法;最后,基于电网实际数据,分析UPFC接入后对系统可靠性的影响,并验证UPFC应用方案对电网可靠性的改善能力。

关键词:统一潮流控制器;可靠性;最优负荷削减

中图分类号:TM715 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2019)06-0041-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.06.009

Reliability Analysis on Application of Double - circuit UPFC to Anhui Power Grid

Lin Zhemin¹, Hu Qian²

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230062, Anhui, China;

2. State Grid Huangshan Electric Power Supply Company, Huangshan 245000, Anhui, China)

Abstract:The unified power flow controller (UPFC) can optimize power flow distribution of power grid and improve transmission capacity of the system. In actual application, the change of system reliability index after UPFC is accessed is an important factor to be considered in UPFC access solution. Aiming at the unbalanced distribution of power flow in Anhui power grid with the continuous expansion of grid scale, the application scheme of double - circuit UPFC structure in Anhui power grid is proposed and its necessity is demonstrated. Then, the reliability model of double - circuit UPFC elements is established. Based on Monte Carlo simulation and optimal load reduction, the reliability evaluation algorithm of power grid with double - circuit UPFC is written. Finally, based on the actual data of power grid, the influence of UPFC access on system reliability is analyzed, and the ability of UPFC application scheme to improve power grid reliability is verified.

Key words:unified power flow controller (UPFC); reliability; optimal load reduction

0 引言

统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)综合并扩展了静止同步串联补偿器(static synchronous series compensator, SSSC)和静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM)两种柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)设备的控制手段与功能,在系统正常运行和故障状态下均可以快速灵活地调节电力系统的潮流分布,对交流输电系统进行实时控制和动态

补偿^[1-2]。

UPFC接入后,有助于解决潮流分布不平衡问题,满足电网时段性灵活可控的要求。然而,UPFC作为系统中新增加元件,对运行可靠性也会产生影响。因此,UPFC接入后系统的可靠性水平变化,是UPFC应用时考量的重要因素。

UPFC接入后对系统的可靠性分析,需考虑其自身可靠性建模和其对系统可靠性影响分析。文献[3]将UPFC等值为正常、降额和停运3种运行状态;文献[4]将UPFC运行状态分为正常、停运、SC-CC模式和STATCOM模式4种状态。文献[5]考虑

了网络攻击对 UPFC 的影响,提出 UPFC 的综合 4 状态可靠性模型。文献 [6] 充分考虑换流器的单独运行和内部备用状态,在三状态和四状态模型的基础上提出了一种九状态模型。然而,上述文献研究的 UPFC 可靠性建模均只针对单回结构,少有文献考虑到 UPFC 的双回结构和换流器系统中 MMC 本身互为备用的情形。

研究 UPFC 对系统的可靠性影响时,现有文献都将 UPFC 简单等值为两状态^[7-8]。但是,UPFC 运行方式灵活多样,简单等值为两状态来考虑 UPFC 对系统可靠性的影响时,夸大了 UPFC 处于故障状态的概率,未考虑到 UPFC 运行于 SSSC 模式和 STATCOM 模式时对系统可靠性的改善作用,影响结果的准确性。

基于上述研究现状,下面以安徽电网实际运行中存在的问题为例,首先根据安徽电网的潮流分析结果和 N-1 校验结果,提出双回 UPFC 结构在安徽电网的应用方案,并论证其必要性;然后,建立双回 UPFC 元件的可靠性模型,并基于该模型建立计及 UPFC 随机故障的电力系统可靠性评估模型;最后,基于电网实际数据,分析 UPFC 接入后对系统可靠性的影响,并验证 UPFC 应用方案的可行性。

1 UPFC 在安徽电网的应用研究

1.1 安徽电网分析

根据 2017—2020 年安徽电网稳态分析报告,安徽电网尤其是合肥电网存在着潮流不平衡以及部分线路不满足 N-1 校验的问题。2020 年,南部电网网架结构如图 1 所示。

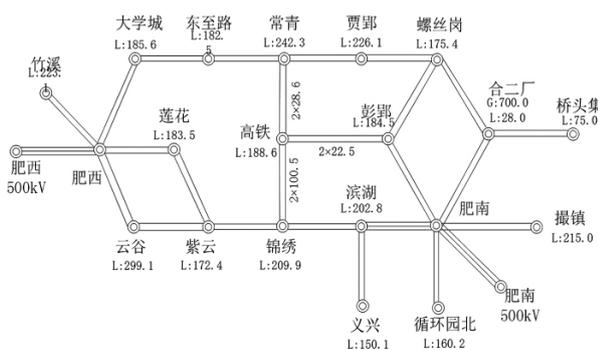


图 1 合肥南部 220 kV 电网网架结构

正常运行方式下,部分重载线路(单回)潮流计算结果如表 1 所示。

表 1 线路潮流计算结果

线路(单回)	有功/MW	容量/MVA	负荷率/%
肥西—大学城	285.8	480	63.6
大学城—东至路	192.8	400	50.7
肥西—莲花	249.9	400	65.6

由表 1 可知,稳态情况下,通过单回肥西—大学城线的有功功率为 285.8 MW,通过肥西—莲花线的单回有功为 249.9 MW,单回线路的负荷率均已超过 50%。同时 N-1 校验结果显示,肥西—大学城线发生单回故障时,另一回线路潮流将达到 570 MW,达到线路热稳定极限的 123%,严重影响了合肥南部分区电网的安全可靠运行水平。

1.2 UPFC 安装方案及必要性

针对合肥南部电网中存在的 N-1 问题以及两端供电结构导致的“卡脖子”现象,提出两类解决方案:1)保持现有网络结构,采取电网加强方案;2)调整南部电网的分区结构,开环运行。

但是电力系统的根本任务是可靠而经济地满足用户的供电需求,开环运行将不可避免地带来系统可靠性降低的问题,所以考虑采用第 1 类方案。

传统的电网加强方案主要有改造和新建线路以及增加区域内新电源。国家大规模鼓励新能源发电并限制火电并网,同时考虑合肥地区的实际情况,增加南部分区新电源的实施难度太大,不予考虑。而新建 220 kV 输电通道建设难度高,建设周期长,投资大;改造肥西—大学城线(2×2.5 km)成更大容量线路,施工难度较大,且大学城—东至路线(2×16 km)的单回线路潮流也已经超过了 50%,随着城区负荷的持续增长,未来也需要改成倍容量导线,投资大。

传统的改造方案均实施难度大,且无法适应南部电网的远景发展规划。220 kV 南京西环网的潮流瓶颈问题和合肥南部电网相似,故考虑通过加装 UPFC 来解决合肥南部电网的稳态潮流问题,并且可以借鉴南京西环网的 UPFC 工程建设经验和 UPFC 运行管理经验。

根据安徽电网的潮流分析结果、UPFC 安装的必要性和可行性分析结果以及工程选址结果,初步计划在肥西变电站 220 kV 侧肥西—大学城线加装 UPFC。

合肥南部电网 220 kV 主干网络均为双回接线,

综合考虑 UPFC 拓扑结构的经济性、灵活性和可靠性,采用图 2 所示的双回 UPFC 应用于安徽电网。

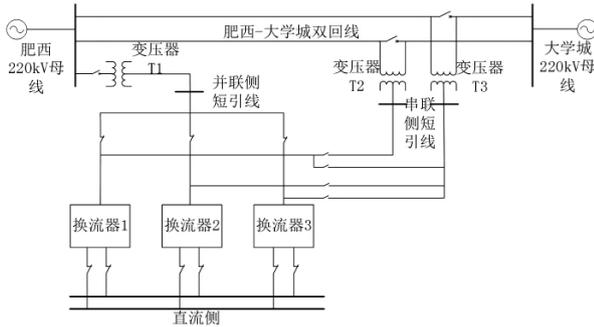


图 2 UPFC 接入位置

正常运行时,一组换流器通过变压器 T1 并联接入肥西 220 kV 母线,与系统交换无功功率,起无功补偿作用,并稳定接入点的交流电压;另两组换流器分别通过变压器 T2、T3 向交流系统注入幅值、相角均可变的串联补偿电压,控制肥西—大学城双回线路的潮流。3 组换流器互为备用,直流侧直接通过转换开关连接直流母线,无需接入直流支撑电容。

当肥西—大学城线发生 $N-1$ 故障时,连接故障线路的 UPFC 串联侧换流器退出运行,UPFC 暂时变为单回结构,控制另一回线路潮流在热稳定极限内。当合肥南部电网 UPFC 安装位置以外线路发生故障时,也可以通过 UPFC 调节肥西—大学城双线实现潮流的再分配。

综合考虑合肥南部电网的潮流控制需求,所采用的接入肥西—大学城双线的 UPFC 基本参数如表 2 所示。

表 2 UPFC 基本参数

参数	数值
额定容量/MVA	3×80
额定直流电压/kV	20
串联补偿电压幅值 U_{sc}	$(0 \sim 0.5)$
串联补偿电压相角	$(0 \sim 2\pi)$

2 含 UPFC 的电力系统可靠性评估

2.1 计及 UPFC 随机故障的电力系统可靠性模型

1) 元件简单停运模型

在不考虑计划停运的情况下,元件的停运模型可简单表示如 3 所示^[9],图中: λ 为元件故障率; μ 为元件修复率。

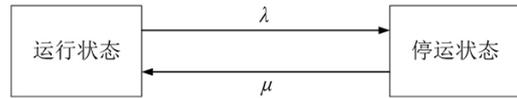


图 3 元件停运模型

2) UPFC 可靠性建模

接入电网的 UPFC 内部组件众多,外在运行方式多样,不能简单表示为运行与停运两种状态。根据 UPFC 的控制原理,将 UPFC 重新划分子系统,即 3 组互为备用的换流器组成子系统 S1,串联侧变压器为子系统 S2,并联侧变压器为子系统 S3,直流侧和控制系统组成子系统 S4。分别建立各个子系统的状态空间模型,形成整个系统的状态空间模型。

子系统 S1 的 3 组换流器可以互为备用,当 1 组换流器发生故障时,可以通过转换开关将剩余两组换流器转换至串联侧,此时 S1 工作于 SSSC 模式;当两组换流器发生故障时,将第 3 组换流器转换至并联侧,此时 S1 工作于 STATCOM 模式;当 3 组换流器均故障时,S1 停运。

综上所述,子系统 S1 有 4 种运行状态:正常(1)、并联侧 STATCOM 模式(0.5+)、串联侧 SSSC 模式(0.5-)、停运(0),其相互转化关系如图 4 所示。

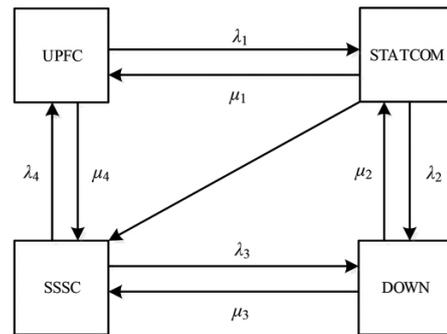


图 4 子系统 S1 状态空间模型

子系统 S2、S3、S4 均只包含一般元件,因而只有工作(1)和故障(0)两种状态。整合各个子系统模型,得到 UPFC 运行状态表,如表 3 所示。

表 3 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

2.2 可靠性指标

计算的可靠性指标包括: 电力系统缺电概率 LOLP、期望缺供电力 EDNS 和期望缺供电量 EENS^[10], 这些指标的具体意义如下:

1) 电力系统缺电概率 LOLP

$$LOLP = \sum_{i \in S} P_i \quad (1)$$

式中: P_i 为系统处于状态 i 的概率; S 为给定时间区间内不能满足负荷需求的系统状态全集。

2) 期望缺供电力 EDNS

$$EDNS = \sum_{i \in S} C_i P_i \quad (2)$$

式中, C_i 为状态 i 条件下削减的负荷功率。EDNS 通常用 MW 表示。

3) 期望缺供电量 EENS

$$EENS = \sum_{i \in S} C_i F_i D_i = \sum_{i \in S} C_i P_i T \quad (3)$$

式中, F_i 是系统处于状态 i 的频率; D_i 为状态 i 的持续时间; T 是给定时间区间的小时数。EENS 通常用 MWh/a 表示。

2.3 含 UPFC 的电力系统最优负荷削减模型

最优负荷削减是系统状态影响评估的关键环节。计及 UPFC 的最优负荷削减模型是在分析系统状态影响时, 考虑计及 UPFC 的系统潮流约束等多个等式约束以及包括 UPFC 控制参数约束在内的多个不等式约束, 获得更小的节点削负荷量。数学模型如下:

1) 目标函数

$$\text{Cutload} = \min \sum X_{pi} \quad (4)$$

式中: Cutload 为系统削负荷量; X_{pi} 为节点 i 的有功削负荷量。

2) 约束条件

含 UPFC 的潮流等式约束:

$$\begin{cases} P_{gi} - P_{di} + X_{pi} + P_i^{\text{UPFC}} - U_i \sum U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} + B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \\ Q_{gi} - Q_{di} + X_{qi} + Q_i^{\text{UPFC}} - U_i \sum U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} - B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \end{cases} \quad (5)$$

发电机出力约束:

$$\begin{cases} P_{gimin} \leq P_{gi} \leq P_{gimax} \\ Q_{gimin} \leq Q_{gi} \leq Q_{gimax} \end{cases} \quad (6)$$

节点负荷约束:

$$\begin{cases} 0 \leq X_{pi} \leq P_{di} \\ 0 \leq X_{qi} \leq Q_{di} \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{P_{di} - X_{pi}}{Q_{di} - X_{qi}} = \frac{P_{di}}{Q_{di}} \quad (8)$$

节点电压约束:

$$U_{imin} \leq U_i \leq U_{imax} \quad (9)$$

线路容量约束:

$$P_{ij}^2 + Q_{ij}^2 \leq T_{ijmax}^2 \quad (10)$$

UPFC 控制参数约束:

$$\begin{cases} U_{semin} \leq U_{se} \leq U_{semax} \\ 0 \leq \theta_{se} \leq 2\pi \\ Q_{shmin} \leq Q_{sh} \leq Q_{shmax} \end{cases} \quad (11)$$

式中: P_{gi} 和 Q_{gi} 分别表示节点 i 上发电机的有功出力和无功出力; P_{di} 和 Q_{di} 分别表示节点 i 上的有功负荷和无功负荷; X_{pi} 和 X_{qi} 分别表示节点 i 的有功负荷削减量和无功负荷削减量; P_i^{UPFC} 和 Q_i^{UPFC} 分别表示 UPFC 对节点 i 的等效注入功率; G_{ij} 和 B_{ij} 分别表示线路 ij 的电导和电纳; P_{gimax} 、 P_{gimin} 分别表示节点 i 上发电机有功出力上、下限; Q_{gimax} 、 Q_{gimin} 分别表示节点 i 上发电机无功出力上、下限; U_{imax} 和 U_{imin} 分别表示节点 i 的电压上、下限; P_{ij} 和 Q_{ij} 分别表示线路 ij 上的有功功率和无功功率; T_{ijmax} 表示线路 ij 的最大容量; U_{semax} 、 U_{semin} 分别表示 UPFC 串联侧等效电压源幅值的上、下限; Q_{shmax} 、 Q_{shmin} 分别表示 UPFC 并联侧无功补偿量的上、下限。

2.4 含 UPFC 的电力系统可靠性评估

基于蒙特卡洛模拟^[11] 和最优负荷削减^[12] 在 Matlab 中编写计及 UPFC 的电力系统可靠性评估程序, 计算可靠性指标, 基本流程如图 5 所示。

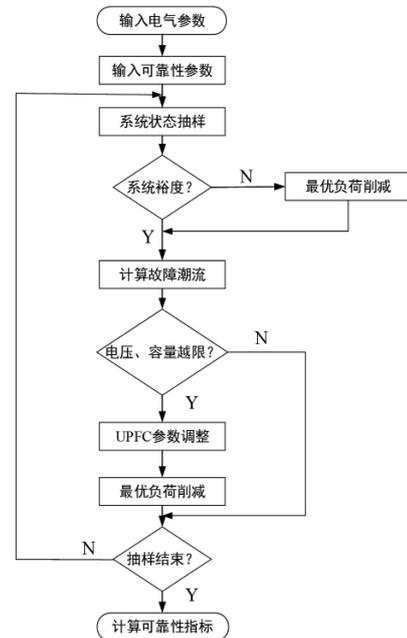


图 5 可靠性评估流程

3 安徽电网实例

利用上述可靠性评估程序对接入 UPFC 的合肥南部电网进行仿真计算。以发电机表示肥西和肥南 500 kV 变电站对 220 kV 侧电网的供电作用。系统基本可靠性参数如下: 线路故障率取 0.01 次/(km·a), 故障修复时间 10 h; 发电机故障率 0.6 次/a, 故障修复时间 100 h。UPFC 的可靠性参数如表 4 所示。

表 4 UPFC 可靠性参数

状态	UPFC	SSSC	STATCOM	DOWN
概率	0.928 3	0.042 4	0.018 2	0.012 0

UPFC 接入在肥西—大学城线靠近肥西侧,UPFC 接入前后系统可靠性指标如表 5 所示。

表 5 计及 UPFC 的系统可靠性指标

可靠性指标	含 UPFC	不含 UPFC
LOLP	0.033 6	0.032 1
EDNS/MW	6.848 9	9.468 4
EENS/(MW·h)	59 996.9	82 943.2

根据表 5 可知,可靠性指标 LOLP 在 UPFC 接入前后变化略小,而 EDNS 和 EENS 指标有较大改善,是因为 UPFC 虽然不能减少合肥南部电网的停电概率,但是可以在故障导致的过负荷情况下进行系统潮流分布的调整,使负荷削减量有所减少,安徽电网的可靠性亦得到改善。

肥西—大学城线是合肥南部电网中重要度和负荷率均较高的线路。为验证上节提出的 UPFC 安装方案的正确性以及 UPFC 安装位置变化时系统可靠性改善效果,将 UPFC 安装于合肥南部电网 3 条不同重载线路时的系统可靠性指标列于表 6。

表 6 UPFC 安装位置对系统可靠性的影响

UPFC 安装位置	系统可靠性指标		
	LOLP	EDNS	EENS
肥西—大学城	0.033 6	6.848 9	59 996.9
大学城—东至路	0.032 3	6.985 4	61 192.1
东至路—常青	0.033 6	7.562 1	66 243.9
不含 UPFC	0.032 1	9.468 4	82 943.2

对比表 5 和表 6 可知,UPFC 安装在合肥南部电网各条重载线路时,系统的可靠性较安装 UPFC 前均有一定程度的改善。其中,UPFC 安装在肥西—大学城线对合肥南部电网可靠性的改善效果最好,

这也验证了上节提出的 UPFC 安装方案的正确性。

4 结 语

针对安徽电网存在的实际问题,提出双回 UPFC 结构在安徽电网的应用方案,建立含双回 UPFC 的系统可靠性模型,并基于电网实际数据,分析 UPFC 接入后对系统可靠性的影响,验证 UPFC 应用方案的可行性。得出以下结论:

- 1) UPFC 接入合肥南部电网肥西—大学城线,可以在 $N-1$ 故障时,控制另一回路潮流在热稳定极限内;
- 2) 应用 UPFC 可以有效解决安徽电网的潮流分布不平衡问题,提高安徽电网可靠运行能力;
- 3) 所提出的 UPFC 应用可靠性模型和 UPFC 应用方案,对安徽电网的可靠性改善效果显著。

参考文献

[1] 国网江苏省电力公司. 统一潮流控制器技术及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.

[2] 高磊, 褚晓杰, 汤涌, 等. 电力系统多 FACTS 交互作用与协调控制综述[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3749-3755.

[3] Aminifar F, Fotuhi - Firuzabad M, Billinton R. Extended Reliability Model of A Unified Power Flow Controller[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2007, 1(6): 896-903.

[4] Rajabi - Ghahnavieh A, Fotuhi - Firuzabad M, Feuillet R. Evaluation of UPFC Impacts on Power System Reliability[C]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, Chicago, IL: 2008.

[5] Yingmeng Xiang, Yichi Zhang, Lingfeng Wang, et al. Impact of UPFC on Power System Reliability Considering Its Cyber Vulnerability[C]. T&D Conference and Exposition 2014 IEEE PES, Chicago: 2014.

[6] 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1): 44-51.

[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] 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): 6-11.

(下转第 60 页)

范公司治理。

3) 完善综合能源服务的融资渠道。面向市场化的综合能源服务意味着更加多元化的融资渠道,电网企业在开展综合能源服务时,可参考南网能源公司 EMC、BOT、BOO、PPP、BT 等五大商业模式的运营经验,在综合考虑客户类型与需求、项目特点与规模的基础上,灵活采用自有资金和市场化资金相结合的融资渠道,保障综合能源服务的资金需求。

4) 形成市场化的引入和用人机制。首先,在引入方面,电网企业需要在明确部门、岗位要求的基础上,通过市场化招聘和电网企业内部竞聘的方式,吸引优秀的暖通、技经、管理等专业人才加入综合能源服务中;其次,在用人和留人方面,电网企业应当提供具有市场竞争力的薪资待遇和与绩效挂钩的奖励,提高员工的工作积极性和激励性,确保综合能源服务高效运行。

4 结 语

1) 综合能源主要指提供综合能源和综合服务,包括能源供应服务、技术设备服务、管理服务、工程服务、投融资服务、其他衍生服务,综合能源服务的兴起代表着中国能源行业重心已从“保障供应”转移到“以用户为中心的能源服务”。

2) 从国外经验来看,综合能源服务的发展离不开政策的支持和引导,国外典型案例的启示要进行市场化的尝试,并注重多能互补、分布式能源开发、虚拟电厂、需求侧管理、大数据、云平台等智能化技术和通信技术的应用,提高能源的利用效率和协同发展。

3) 中国综合能源服务市场潜力巨大,但产业仍处于零星布局阶段,尚未全面展开,从现有实践经验

来看,国内综合能源服务在规模化发展、产业布局、能源协同、数据分析和平台建设等方面仍比较薄弱。

4) 电网企业应在传统售电业务的基础之上,开展节能服务、新能源服务、数据增值服务、能源金融服务,构建面向市场化的组织架构、价格机制、融资渠道和用人机制,借助技术优势和信息化支撑,以新建园区为重点,以高负荷地区为首选,实现能源产品全覆盖、综合能源服务个性化和智能化。

参考文献

- [1] 杰里米·里夫金. 第三次工业革命: 新经济模式如何改变世界[M]. 北京: 中信出版社, 2012.
- [2] 曾鸣, 刘道新, 李娜. 综合能源系统的关键经济问题研究[J]. 华东电力, 2013, 41(7): 1403-1408.
- [3] 胡浩, 王英瑞, 曾博. 基于 CVaR 理论的综合能源系统经济优化调度[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 209-219.
- [4] Jain N, Alleyne A. A Framework for the Optimization of Integrated Energy Systems [J]. Applied Thermal Engineering, 2012, 48: 495-505.
- [5] 曾鸣, 杨雍琦, 刘敦楠. 能源互联网“源-网-荷-储”协调优化运营模式及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 114-124.
- [6] Zhou J, Yang S, Shao Z. Energy Internet: The Business Perspective [J]. Applied Energy, 2016, 178: 212-222.
- [7] 刘敦楠, 曾鸣, 黄仁乐. 能源互联网的商业模式与市场机制(二) [J]. 电网技术, 2015, 39(11): 3057-3063.
- [8] 封红丽. 国内外综合能源服务发展现状及商业模式研究[J]. 电器工业, 2017(6): 34-42.
- [9] 应鸿, 张扬. 综合能源服务知识体系研究[J]. 浙江电力, 2018, 37(7): 1-4.

作者简介:

魏 阳(1987) 硕士, 工程师, 研究方向为企业运营管理。
(收稿日期: 2019-09-30)

(上接第45页)

- [9] 钟贵和. 基于灵敏度方法的输电有功运行风险控制 [D]. 广州: 广东工业大学, 2014.
- [10] 张安福. 风光联合发电系统并网对锡林郭勒电网可靠性的影响[J]. 内蒙古电力技术, 2019, 37(1): 35-40.
- [11] 刘洋. 发输电系统可靠性评估的蒙特卡洛模型及算法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2003.
- [12] 吕磊炎, 赵渊, 谢开贵. 柔性交流输电系统交直流潮流

流可靠性评估模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(1): 1-7.

作者简介:

林哲敏(1985) 博士, 高级工程师, 主要研究方向是电力系统可靠性分析、电能质量、电力交易市场;
胡 骞(1993) 工程师, 研究方向为电力系统可靠性分析。
(收稿日期: 2019-07-30)