

含故障限流器的安徽电网经济性评估

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, 合肥 230062; 2. 合肥工业大学安徽省新能源利用与节能重点实验室, 合肥 230009)

摘要: 加装故障限流器(FCL)是解决短路电流越限问题的一种有效技术措施。为提高电力企业对FCL潜在经济效益的认同, 加快FCL在电网中的推广应用, 文中从FCL接入减轻断路器的动、热稳定负担提高其动作可靠性的作用出发, 定义可靠性成本和可靠性效益的概念。结合全寿命周期成本理论, 将FCL的全寿命周期成本视为可靠性成本。将FCL接入前后断路器拒动概率变化所带来的停电损失差额视为可靠性效益。考虑资金的时间因素, 得出基于可靠性的FCL经济性评价指标及电网综合经济性评估模型, 并在安徽电网中进行所提模型的仿真验证。该模型可以为FCL的工程应用提供经济技术参考。

关键词: 故障限流器; 可靠性成本; 可靠性效益; 经济性评估; 安徽电网

Economic Evaluation of Anhui Power Grid with Fault Current Limiter

LIN Zhemin¹, HU Qian², MAO Xun¹, ZHANG Xuchang¹, LI Binbin¹, HAN Pingping²

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230062, China; 2. Anhui Key Laboratory of New Energy Utilization and Energy Saving, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: To help power enterprises further understand the potential economic benefits from application of fault current limiter(FCL) and accelerate the promotion of FCLs in power grids, the concepts of reliability cost and reliability benefit are defined from the view point of using FCLs to improve the dynamic and thermal stability and operational reliability of the circuit breakers. The life cycle cost of an FCL is regarded as reliability cost. The outage loss difference caused by the change of the rejection probability of the circuit breaker before and after the FCL access is regarded as the reliability benefit. Considering the time factor of capital, the FCL economic evaluation index based on reliability and the comprehensive economic evaluation model of power grid are established, and the proposed model is simulated on Anhui power grid. The model may provide economic and technical reference for engineering application of FCLs.

Key words: fault current limiter (FCL); reliability cost; reliability benefit; economic evaluation; Anhui power grid

0 引言

随着新电源的接入和用电负荷的不断增长, 安徽电网的短路电流水平持续上升。短路电流对电力系统的安全可靠运行以及电力设备本身都具有很大的危害性, 已经成为制约电网运行和发展的重要因素^[1]。目前针对安徽电网短路电流过限问题主要有两个考虑方案: 一是更换更大容量的断路器等电力设备; 二是加装故障限流器(fault current limiter, FCL)^[2-5]。

FCL技术性能优良, 限制FCL广泛应用的一个

重要因素是其成本昂贵, 远远高于同电压等级的断路器和变压器^[6-7]。但随着电力行业逐渐走向市场化, 供电方不再以节省投资为单一目的, 而开始注重投资的效益^[8]。加装FCL会给电网带来额外的投资成本, 但是FCL接入也会带来潜在的经济效益。所以对故障限流器进行经济性评估就具有重大的现实意义。

故障限流器的研究始于20世纪90年代, 得到重点研究的FCL类型主要有3种: ①超导限流器(superconducting FCL), 超导型限流器又分电阻型、磁屏蔽型、饱和铁心型3种; ②串联谐振限流器(series resonance FCL); ③电力电子型限流器

(flexible FCL)^[9-12]。

理想限流器在正常运行时阻抗为零、功率损耗也为零,系统发生短路故障时能迅速接入一个大的阻抗以限制短路电流。FCL接入系统后可以提高断路器、互感器等各种高压电气设备的动作可靠性^[13-16],降低系统的停电损失,而停电损失作为一项可靠性指标,必须以可靠性研究为基础。故提出一种基于可靠性的故障限流器经济性评估模型。

文中以全寿命周期成本理论为基础,综合考虑电力系统经济性与可靠性。通过研究故障限流器(FCL)接入对安徽电网中断路器可靠性的影响,比较FCL接入前后的可靠性成本和可靠性效益,来建立一个量化的经济性评估模型。

1 故障限流器经济性评估模型

电力市场理念的兴起使人们对可靠性的理解发生了变化,人们认识到由于减少投资造成的停电损失超过节省资金的可能性。提高电网的可靠性虽然增加了电网的资金投入,但可靠性的提高却可以带来潜在的经济效益^[17]。因此兼顾可靠性的电力系统经济性评估是一项具有重大意义的课题。

1.1 可靠性成本分析

传统的可靠性成本指的是电力部门为了使电网达到一定的可靠性水平而额外增加的一次性投资成本。传统的定义存在着只注重短期投资、忽略中长期成本的不足。结合全寿命周期成本理论,定义了一种考虑时间因素和设备运行维护、故障成本在内的可靠性成本。

全寿命周期成本(life cycle cost, LCC)是指在产品寿命周期内所发生的或预期发生的包括产品设计、制造、运行、维护以及报废处理在内的所有费用总和。LCC基本框架包括初始投资成本(CI)、运行成本(CO)、检修维护成本(CM)、故障损失成本(CF)和退役处置成本(CD)^[18]。

对于短路电流过限的系统,加装FCL的目的就是为了限制短路电流水平,提高电力系统的运行可靠性。因此在对于含FCL的电力系统经济性评估中,故障限流器的全寿命周期成本就可以视为可靠性成本。考虑到资金具有时间价值,不同时间付出或者得到同样数额的资金在价值上不等,即资金的价值会随时间发生变化^[19]。为了实现FCL设备经济性的正确评价,必须把不同时点的资金换算成同一时点上的资金,然后在相同的时间基础上进行比较。先计算出在FCL设备寿命期间各年所花费的成本,再按应用最普遍的净现值法(NPV)折算到设

备购置初期的折现值,同时考虑社会的通货膨胀水平,将各年的折现值综合起来,得到可靠性成本的计算公式

$$LCC_n = CI + CD \times \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^n + \sum_{j=0}^n (CO + CF + CM) \times \left(\frac{1+i}{1+r} \right)^j \quad (1)$$

式(1)中: n 指故障限流器的使用寿命; i 指社会基本折现率; r 指社会通货膨胀率。

1.2 基于可靠性的经济性评估模型

1.2.1 断路器可靠性模型

接入故障限流器能限制电网的短路容量,降低电力系统的短路电流水平,减轻断路器等各种高压设备的动热稳定负担,提高其可靠性。断路器对电力系统的安全和可靠运行具有极其重要的作用,它动作的可靠性将影响到电力系统故障能否被及时切除以及故障后电力系统的停运范围。本次研究将从断路器的可靠性入手,分析FCL接入前后断路器拒动概率的变化情况。

断路器的拒动概率 P_F 和故障时流过断路器的短路电流值 I_f 有关。断路器拒动概率模型见图1,图1中: I_a 是断路器的额定值,而且被假定在 I_1 和 I_0 之间。流过断路器为低故障电流($I_f < I_0$)时,断路器拒动概率为0,即断路器可以完全可靠动作。当故障电流超过上限阈值($I_f > I_1$)时,断路器拒动概率为1,即断路器完全无法切除故障线路。当 I_f 在 I_1 与 I_0 之间时,假定断路器故障的概率与故障电流大小之间成线性关系,并且从0转化到1^[20-22]。

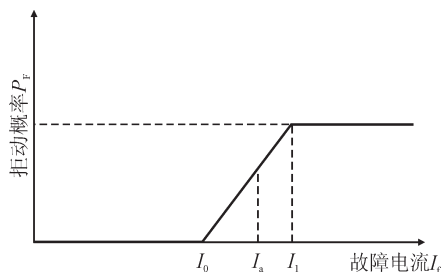


图1 断路器拒动概率模型

Fig. 1 Model of rejection probability of circuit breaker

受故障电流水平影响的断路器故障概率为一条件概率,它表示的是当一个故障发生在断路器保护区间时,断路器拒动的概率 P_{BF} ,可简化为

$$P_{BF} = (1 - e^{-\lambda}) \sum_{I_f} w(I_f) P_F(I_f) \quad (2)$$

式(2)中: $1 - e^{-\lambda}$ 为断路器保护区间内发生故障的概率; $w(I_f)P_F(I_f)$ 为断路器的条件概率密度。

1.2.2 可靠性效益分析

传统的可靠性效益定义为电网可靠性达到一

定的水平而使电力企业和用户获得的效益。由于社会经济效益包含多方面因素,传统方法未对其进行量化考虑。文中用减损效益来刻画 FCL 的可靠性效益,亦即接入 FCL 提高断路器可靠性带来的电力系统停运范围、停运时间减小的那部分效益来表示。减损效益不仅包含电力企业经济损失减少的效益,同时也包含电力用户停电损失减少的效益,并且后者通常为前者的几十倍。

在工程上,经济风险的简易表达形式为

$$Risk = Consequence \times Probability \quad (3)$$

将式(3)推广到电力设备领域,关于断路器故障的经济风险可以由式(4)得到

$$Risk = C_{CB} \times P_{BF} \quad (4)$$

式(4)中, C_{CB} 指电力系统发生故障时,相关断路器拒动造成电力系统停电范围扩大所造成的停电损失差额, C_{CB} 按如下方法计算

$$C_{CB} = (L_{m2} - L_{m1}) \times D_s \quad (5)$$

式(5)中, L_{m2} 指当故障 m 发生时断路器拒动中断的负荷量; L_{m1} 指故障 m 发生时断路器未拒动中断的负荷量; D_s 指单位负荷的停电损失, D_s 数值取决于负荷类型与停电时间^[23]。

故障限流器接入后,流过断路器的故障电流减小,断路器的应力水平也随之下降低,断路器的故障概率降低,故障损失也就减少,电力企业和电力用户也就可以降低经济风险。电网在故障限流器接入后的可靠性效益为

$$C_T = C_{CB} \times (P_{BF, \text{without FCL}} - P_{BF, \text{with FCL}}) \quad (6)$$

式(6)中: $P_{BF, \text{without FCL}}$ 指接入 FCL 前断路器的年拒动概率; $P_{BF, \text{with FCL}}$ 指接入 FCL 后断路器的年拒动概率。

1.2.3 经济性评价指标

综合式(1)、(6),通过比较故障限流器的全寿命周期成本与断路器在 FCL 接入前后的减损效益,综合可靠性成本和可靠性效益,建立基于可靠性的 FCL 经济性评估模型。考虑资金的时间因素,减损效益也需折算到同一时点,得到基于可靠性的 FCL 经济性评价指标 E_s 为

$$E_s = \sum_{j=0}^n \frac{C_T (1+r)^j}{(1+i)^j} - LCC(n) \quad (7)$$

式(7)中: i 表示折现率; n 表示故障限流器的使用寿命; r 表示通货膨胀率。

当 E_s 大于 0 时,表示故障限流器接入电力系统中经济效益良好;当 E_s 小于 0 时,表示故障限流器接入电力系统中经济效益较差;当 E_s 接近 0 时,表示故

障限流器接入电力系统在经济性上有可行性。

2 实例分析

2.1 短路电流与可靠性分析

文中的算例采用的是安徽电网中肥西变电站 220 kV 侧系统的简化模型。肥西 220 kV 母线接线情况见图 2。

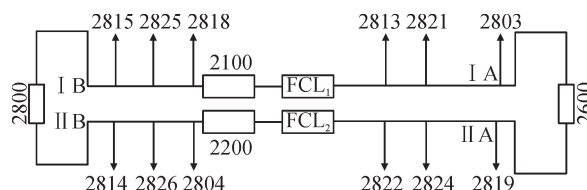


图2 肥西 220 kV 母线接线图

Fig. 2 Wiring diagram of 220 kV Feixi bus

2020 年,金源热电计划投产,合肥地区总负荷也将由 2016 年的 2 272 MW 增长到 2020 年的 3 437 MW。肥西变电站作为合肥电网南部分区一个重要变电站,负荷的增长将导致其短路电流水平大幅度的升高,母线短路电流将超过变电站现有 220 kV 断路器的遮断值。根据前文分析将有两个考虑方案:①更换更大遮断容量的断路器等设备;②接入故障限流器 FCL 以限制短路电流。

通过对安徽电网薄弱环节的扫描, FCL 计划安装在 2100、2200 位置,共两组设备。应用 PSD-SCCP 程序得到的系统短路电流,以肥西 1A 母线为例,在接入 FCL 后,母线上总的三相短路电流由 51.702 7 kA 下降为 41.622 5 kA,下降幅度为 19.5%,肥西 1A 和肥西 1B 之间的短路电流由 17.633 4 kA 下降为 6.758 5 kA,下降幅度为 61.7%,下降明显。其余各条母线在 FCL 接入前后短路电流的变化见表 1。

表1 FCL 接入前后母线短路电流变化表

Table 1 Variation of bus short circuit current before and after FCL access

线路名称	未接入 FCL/ kA	FCL 接 1A1B 和 2A2B/ kA
肥西 1A-肥西 1B	17.633 4	6.758 5
肥西 1A	51.702 7	41.622 5
肥西 1B-肥西 1A	20.816 3	6.855 1
肥西 1B	51.633 4	41.008 7
肥西 2A-肥西 2B	20.677 4	6.778 5
肥西 2A	51.740 0	41.601 0
肥西 2B-肥西 2A	17.790 2	6.822 1
肥西 2B	51.797 0	41.209 5

综合分析各条母线的短路电流变化情况,发现肥西四段母线的三相短路电流都被限制在 41 kA 左

右,并且通过母联断路器的短路电流下降明显,降幅为65%左右。由之前的断路器可靠性分析知道,流过断路器的故障电流会影响到断路器的故障概率,故障电流越小,施加在断路器上的应力水平就越低,断路器的动、热稳定性就越好,拒动概率就越低。

分段断路器2100和2200是遮断值为50 kA的220 kV断路器,原则上流过断路器的短路电流不能大于50 kA,所以假设故障电流阈值上限 $I_1=50$ kA,即认为当短路电流超过50 kA时,断路器不能可靠动作。故障电流阈值下限在技术上难以得到准确的值,因此假设 $I_0=0$ kA。计算得到分段断路器在母线故障条件下的拒动概率见表2。

表2 断路器拒动概率

Table 2 Rejection probability of circuit breaker

故障母线	断路器名称	故障概率 (未接 FCL)	故障概率 (接 FCL)
肥西 1A	2100	0.353	0.135
肥西 1B		0.416	0.137
肥西 2A	2200	0.414	0.136
肥西 2B		0.356	0.136

2.2 FCL经济性综合分析

根据1.2中得出的FCL经济性评估模型的评价指标,对经济性的分析分为两个部分:①可靠性成本,指FCL设备本身在其生命周期内包括购买、运行维护、故障在内的总的费用;②可靠性效益,指FCL接入后对断路器可靠性提高所带来的差异化效益,包括供电公司多售电的效益和减少的国民经济损失。

故障限流器的成本取决于其类型和电压等级,一套220 kV等级的超导故障限流器购置成本为3 000万元,使用寿命为30年,预防维护成本、退役设备处理费用分别近似为设备投资总额的1%,2%,残值回收率为5%,单次故障校正成本为5万元/次,具体费用见表3。

表3 FCL全寿命周期成本费用表

Table 3 Life cycle cost of FCL

名称	成本费用	数值
CI	购置成本/万元	3 000
CO	运行成本/万元/年	30
CM	维护成本/万元/年	
	故障校正成本/万元/次	5
CF	故障成本/万元/次	0
CD	退役处置费用/万元	60
	残值回收费用/万元	150

FCL设备的可靠性较高,年故障率为0.1,FCL故障时,系统状态就相当于未接入FCL之前,不会造成差异的经济性变化。变电站母联位置接入FCL,忽略场地购置以及环境影响等费用,将运行维护、故障成本和退役处置成本归算到FCL计划投入的2020年,计算得到一套FCL设备在其生命周期30年内总费用为3 477.1万元。

根据前文中FCL接入后对周边设备可靠性的影响分析,在FCL接入电力系统后可以有效的降低断路器的拒动概率,提高其工作可靠性,减少当母线故障时的停电范围,降低停电损失。停电损失它不仅包含电力用户的经济损失,而且也包括电力企业的经济损失,通常用户的停电损失是电力企业损失的几十倍。一个综合电力用户停电的损失函数^[24],见表4。

表4 综合电力用户停电损失函数表

Table 4 Outage function of comprehensive power

consumers	
停电时间	停电损失/[元·(kW·h) ⁻¹]
30 s	18.2
1 min	18.9
20 min	38.8
1 h	75.0
2 h	118.0

肥西变电站220 kV负荷简化模型:肥西—云谷线视为负荷1(323.8 MW);肥西—莲花线视为负荷2(372 MW);肥西—大学城线视为负荷3(693.6 MW);肥西—竹溪线视为负荷4(223.2 MW)。FCL接入前肥西变电站所连负荷的停运情况见表5。

假设肥西变电站负荷的年增长率为5%,220 kV母线的年故障概率为1.30%,单次故障时,单次停电时间为2 h,售电电价为0.6元/kW。折现率 i 为8%,通货膨胀率为3%。比较FCL接入前后的故障损失费用,得到在FCL整个寿命周期30年的可靠性效益(所有数据均归算到2020年)见表6。

综合30年的可靠性效益,折算到2020年得到的可靠性效益的值为54 328 968元。

经济性评价指标 E_s 为

$$E_s = \sum_{j=0}^n \frac{C_r(1+r)^j}{(1+i)^j} - LCC_{(n)} = -1\,521 \text{ 万元}。$$

E_s 为一个负值,以30年为一个生命周期来说,它不具备良好的经济效益。

若考虑更换断路器来改变短路电流过限的现状。变电站现有的220 kV断路器遮断值为50 kA,一个含同型号断路器的间隔造价大约在300万元左右。遮断值为60 kA的220 kV断路器市场上并没

表5 可靠性数据表
Table 5 Reliability data

事件	状态概 率/%	负荷 1(323.8 MW)		负荷 2(372 MW)		负荷 3(693.6 MW)		负荷 4(223.2 MW)	
		停运 率/%	停电时 间/h	停运 率/%	停电时 间/h	停运 率/%	停电时 间/h	停运 率/%	停电时 间/h
1A故障、 2100拒动	0.004 589	0.000 000	0	0.000 000	0	0.004 589	2	0.000 000	0
1B故障、 2100拒动	0.005 408	0.000 000	0	0.000 000	0	0.005 408	2	0.000 000	0
2A故障、 2200拒动	0.005 382	0.005 382	2	0.005 382	2	0.005 382	2	0.005 382	2
2B故障、 2200拒动	0.004 628	0.004 628	2	0.004 628	2	0.004 628	2	0.004 628	2

表6 可靠性效益表
Table 6 Reliability benefit

时间 /年	FCL接入前				FCL接入后				
	停电量/ MW	用户损 失/元	电力公司 损失/元	故障校正 费用/元	停电量/ MW	用户损 失/元	电力公司 损失/元	故障校正 费用/元	可靠性 效益/元
2020	23.082 05	2 730 837	13 849	300 000.00	8.156 845	1 063 953.0	5 395.753	30.00	1 675 337
2021	21.401 95	2 532 065	4.537 874	264 917.70	7.563 124	965 036.3	4537.874	264 917.70	1 575 332
2022	19.844 15	2 347 761	11 906.49	233 938.00	7.012 619	894 793.2	4207.571	233 938.00	1 460 667
2023	18.399 73	2 176 872	11 039.84	20 6581.00	6.502 184	829 662.9	3901.310	206 581.00	1 354 347
...	...	...	...	...	...	—	—	...	—
2050	2.785 413	329 542.2	1 671.248	8 795.22	0.984 322	116 455.2	590.593	8 795.22	214 114

有,在这里,假设一个含遮断值 60 kA 设备的间隔造
价为含遮断值 50 kA 设备造价的 1.5 倍,为 450 万元
一个间隔。肥西变电站 220 kV 侧共有 8 回出线,
3 台变压器,和 4 个分段断路器,一共 15 个间隔,为
方便统一备用和检修,所有设备将一并更换,总更
换费用将达到 6 750 万元。

从长远来看,加装故障限流器的措施能更好的
解决短路电流过限问题,且在经济性方面更有优势。

3 结语

文中从 FCL 接入对断路器可靠性的影响出发,
分析了含 FCL 电力系统的经济性,建立了一个综合
考虑可靠性效益和可靠性成本的经济性评估模
型。同时通过安徽电网的实例仿真证明了该模型
的可行性,得到了 FCL 在接入电网后的可靠性和
经济性数据,对 FCL 在电网中的实际应用具有指
导意义。

参考文献:

[1] 刘 凯. 故障限流器在电力系统中应用研究现状[J]. 电

力系统保护与控制,2010,38(7):147-151.
LIU Kai. Study situation of applications of fault current
limiter in power system[J]. Power System Protection and
Control,2010,38(7):147-151.
[2] 孙树敏. 电力系统故障限流器研究综述[J]. 电网技术,
2008,32(21): 75-79.
SUN Shumin. A summarization of research on fault current
limiter of power system[J]. Power System Technology ,2008,
32(21):75-79.
[3] 李 明.电力系统故障限流器技术的研究[J]. 电气时代,
2005(4): 54-56.
LI Ming. Research on fault current limiter of power system
[J]. Electric Age,2005(4):54-56.
[4] 林玉宝. 超导故障限流器及其研究现状[J]. 电工电能新
技术,1997(3): 14-19.
LIN Yubao. Superconducting fault current limiters and
their research status[J]. Advanced Technology of Electrical
Engineering and Energy, 1997(3):14-19.
[5] 郑健超. 故障电流限制器发展现状和应用前景[J]. 中国
电机工程学报,2014,34(29):5140-5148.
ZHEN Jianchao. Current status and application prospect of
fault current limiters[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34
(29):5140-5148.

- [6] 王少华. 用于配电网的故障限流器的研究[D]. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2012.
WNAG Shaohua. Research on fault current limiter for the power distribution grid[D]. Beijing: School of Electrical and Electronic Engineering of North China Electric Power University, 2012.
- [7] 唐宗华. 面向高压电网的经济型故障限流器的关键技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2013.
TANG Zonghua. Study on key technology of economical-type fault current limiter on HV grid[D]. Jinan: Shandong University, 2013.
- [8] 郇嘉嘉, 王 钢, 李海峰, 等. 多目标决策分析的电网综合停电管理模型[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2802-2807.
XUN Jiajia, WNAG Gang, LI Haifeng, et al. A comprehensive outage management model based on multi-objective decision analysis[J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2802-2807.
- [9] GARZON R D. High voltage circuit breakers, design and applications[M]. 2nd ed. New York: Marcel Dekker, 2002.
- [10] 应林志, 王建全, 陈 迅, 等. 广东电网超高压短路限流器优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(4): 96-100.
YING Linzhi, WANG Jianquan, CHEN Xun, et al. An optimal configuration scheme for ultra-high voltage short-circuit current limiter in guangdong power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(4): 96-100.
- [11] 张彦涛, 秦晓辉, 项祖涛, 等. 饱和铁芯型高温超导故障限流器仿真建模及短路特征研究[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1562-1568.
ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, XIANG Zutao, et al. Modeling of saturated iron-core high temperature superconductive fault current[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1562-1568.
- [12] ABEYGUNAWARDANE S K, SISIRA J R S, EKANAYAKE KUMARA J B. A magnetic-core based fault current limiter for utility applications[J]. J. Natn. Sci. Foundation Sri Lanka, 2011, 39(3): 227-234.
- [13] GHAEEMI S, ABAPOUR M. Effect of fault current limiter (FCL) on reliability and protection coordination of distribution system[C]//24th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE). Shiraz, Iran: [s. n.], 2016: 726-731.
- [14] ESCOBAR A, BALDA J, BOURNE J, et al. Enhancing power quality on distribution systems with fault-current limiters[C]// IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT). Washington, DC, USA: IEEE, 2012: 1-5.
- [15] KIM S Y, KIM W W, KIM J O. Determining the location of superconducting fault current limiter considering distribution reliability[J]. IET Generation, Transmission Distribution, 2012, 6(3): 240-246.
- [16] 陆佳政, 赵 纯, 方 针, 等. 新型故障限流器的仿真和现场试验[J]. 高电压技术, 2010, 36(9): 2258-2264.
LU Jiazheng, ZHAO Chun, FNAG Zhen, et al. Simulation and experiment of a novel fault current limiter[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(9): 2258-2264.
- [17] 牛 辉, 程浩忠, 张 焰, 等. 电网扩展规划的可靠性和经济性研究综述[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(1): 51-56.
NIU Hui, CHENG Haozhong, ZHANG Yan, et al. Review of reliability and economic problems in transmission expansion planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(1): 51-56.
- [18] 柳 璐. 基于全寿命周期成本的电力系统经济性评估方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(15): 45-50.
LIU Lu. Economic evaluation of power systems based on life cycle cost[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(15): 45-50.
- [19] 陈海涵, 李孝宇, 王维军. 基于LCC理论的电网技改项目准入模型研究[J]. 陕西电力, 2012(8): 36-40.
CHEN Haihan, LI Xiaoyu, WANG Weijun. Research on technical improvement admittance optimization model for power equipment based on life cycle cost theory[J]. Shangxi Electric Power, 2012(8): 36-40.
- [20] HAGHIFAM M R, GHADERI A, ABAPOUR M. Enhancement circuit breaker reliability by using fault current limiter [C]//IEEE Power & Energy Society General Meeting. Calgary, AB, Canada: IEEE, 2009: 1-5.
- [21] DAM Q B, MELIPOULOS A P S. Failure probability methodology for overdrutied circuit breakers[C]//38th North American Power Symposium. Carbondale, IL, USA: [s. n.], 2016: 667-672.
- [22] DAM Q B, MELIPOULOS A P S. Reliability implications of increased fault currents and breaker failures[C]//Bulk Power System Dynamics and Control - VII. Revitalizing Operational Reliability, 2007 iREP Symposium. Charleston, SC, USA: [s. n.], 2007: 1-8.
- [23] 张 奇, 龚佩新, 胡 杰, 等. 停电损失方法的估算研究[J]. 华东电力, 2012, 40(11): 2033-2035.
ZHANG Qi, GONG Peixin, HU Jie, et al. Research for the estimation method of the interruption cost[J]. East China Electric Power, 2012, 40(11): 2033-2035.
- [24] 张 焰. 电网规划中的可靠性成本—效益分析研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 33-36.
ZHANG Yan. Research on cost-benefit analysis of electric power network[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 33-36.

林哲敏(1985—),男,工程师,博士,主要研究方向是电网分析、电能质量研究。