一种断路器风险评估模型的研究

断路器作为输配电网中的重点设备，在电力系统中扮演着控制和保护的重要作用，其可靠运行对整个电网安全具有重大作用。从负荷损失风险、设备损失成本、人身安全和环境等影响断路器风险的因素进行研究，建立针对断路器的风险评估模型，计算断路器当前风险状态以及未来一段时间内的风险变化趋势，从而为断路器检修计划的制定以及投资规划提供技术支持。

石　杨[1]　肖　颐[1]　杨平安[1]　周贵发[1]　吴雪玲[2]　方育阳[2]/1.贵州电网公司都匀供电局　2.厦门红相电力设备股份有限公司

石　杨/工程师

关键词/Keywords
断路器·
风险评估·
风险因素·

0　引言

断路器作为输变电系统中的重点设备，扮演着控制和保护的重要作用，主要用于完成电力回路的正常连通、开断操作，或在系统发生故障时正确动作并迅速将故障回路切断，使用量大、面广，同时设备检修维护量也较大。断路器的安全可靠运行与供电可靠性密切相关，如果可靠性不高，不仅会导致供电不正常，甚至会危及整个电网的安全，因此，对其开展状态检修具有良好的社会效益和经济效益[1-4]。

状态检修作为一种较定期检修模式更能降低维修成本，缩短检修停电时间，延长设备寿命的检修模式，已越来越受到我国电力企业的欢迎。2007年国家电网公司《输变电设备状态检修管理规定》将状态检修定义为：企业以安全、可靠性、环境和成本等为基础，通过设备的状态评价、风险分析，制定设备的检修计划，达到设备运行可靠、检修成本合理的一种设备维修策略[6]。因此，设备风险评估是作为设备状态检修的一个重要内容。

本文从负荷损失风险、设备损失成本、人身安全和环境影响四个方面出发，对影响断路器风险的因素进行研究，建立针对断路器的风险评估模型，实现断路器风险评估，从而为断路器检修计划的制定以及投资规划提供技术支持。

1　断路器风险评估

风险可以描述为设备故障或事故所造成损失的可能性，通常被定义为以下两个部分：①事故发生的可能性；②事故产生的影响和后果。

风险评估通过对设备故障发生概率和故障后果的定义和定量分析，从负荷损失风险、设备损失成本、人身安全和环境影响等方面计算各种风险值[10-11]。

1）负荷损失风险。从设备故障或事故对电网供电持续性和负荷损失数影响的角度来衡量事件的后果，衡量指标包括停电次数、停电分钟数和平均停电负荷量。

2）设备损失成本。故障或事故所造成的设备直接和间接损失，包括修复该故障或事故所需的设备成本、试验成本和人工成本等。

3）人身安全。故障或事故可能造成的人身伤害损失。

4）环境影响。设备故障或事故可能引发的环境影响，如油泄露、SF_6气体泄露、火灾事故和固体废弃物等。

断路器风险模型构成框图如图1所示。

根据图1，断路器的风险计算公式表示为

$$RISK = R_{NP} + R_{OP} + R_{SA} + R_{EN} \quad (1)$$

式中，RISK为断路器总风险；R_{NP}为负荷

中国知网　https://www.cnki.net

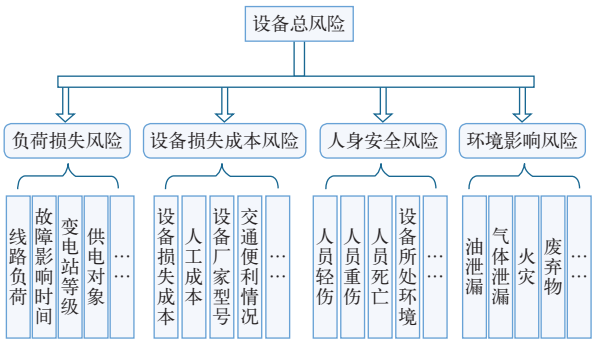

图1　断路器风险模型构成框图

损失风险；R_{OP}为设备损失成本风险；R_{SA}为人身安全风险；R_{EN}为环境影响风险。

1.1　负荷损失风险的计算

负荷损失风险是从断路器故障可能引发电网负荷损失的角度来进行量化的，由负荷损失风险的故障后果以及修正系数组成。

断路器发生故障有可能引起强迫停运，导致电网负荷处于非计划停运状态，因此，本文将负荷损失风险划分为高风险期和低风险期。高风险期指设备发生故障至调度中心完成故障隔离的时间；低风险期指故障设备退出至重新投入运行的时间。本文关于不同故障类型所对应的高风险期和低风险期的曲线情况如图2所示。

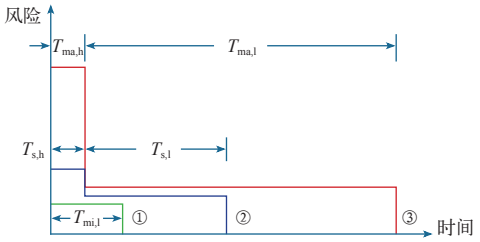

图2　断路器故障的高低风险期

图2中：曲线①代表小型故障所对应的风险期；曲线②代表中等故障所对应的风险期；曲线③代表重大故障所对应的风险期。

此外，为了计算断路器负荷损失风险的故障后果，除了明确断路器故障后的高低风险期外，还需综合考虑断路器所在线路的负荷容量、系统接线方式等。在本文当中，所有设备风险均采用产电比法进行量化。

负荷损失风险的故障后果计算公式为

$$CF_{NP}=\sum_{i=1}^{4}L(T_{HRi}F_{HRi}+T_{LRi}F_{LRi})V \qquad (2)$$

式中，CF_{NP}为负荷损失风险的故障后果；L为用于风险计算的负荷；T_{HRi}为各故障类型高风险期的持续时间；F_{HRi}为各故障类型高风险期的负荷损失概率；T_{LRi}为各故障类型低风险期的持续时间；F_{LRi}为各故障类型低风险期的负荷损失概率；V为产电比；i为1、2、3和4，分别代表小型、中等、重大和拒动故障。

在计算得到断路器负荷损失风险故障后果的同时，还需计算其相应的修正系数。负荷损失风险故障后果修正系数的计算框架如图3所示。

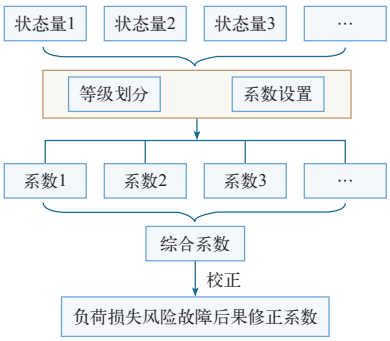

图3　负荷损失风险故障后果修正系数计算框架

负荷损失的修正系数主要考虑了变电站重要等级、配件获取难易程度以及供电对象负荷等级三个因素。其表达式为

$$CA_{NP}=\frac{f_1f_2f_3}{\text{average}(\sum_{1}^{i}f_1f_2f_3)} \qquad (3)$$

式中，CA_{NP}为负荷损失的修正系数；f_1为变电站重要等级系数；f_2为配件获取难易系数；f_3为供电对象负荷等级系数；i为参与评估的断路器台数。

负荷损失风险是根据负荷损失风险的故障后果、相应的修正系数以及故障发生概率计算得到，断路器负荷损失风险计算公式为

$$R_{NP}=\sum_{i=1}^{4}CF_{NP}CA_{NP}FR \qquad (4)$$

式中，R_{NP}为负荷损失风险；FR为断路器的故障概率。

1.2　设备损失成本风险的计算

当断路器发生故障时，自身设备可能承受

中国知网　https://www.cnki.net

一定的损坏，那么要将断路器恢复到可正常工作状态，就需要付出一定的成本，例如设备维修费用或者更换费用。同时，也需考虑在进行维修或者更换时所需的试验成本、人力调配等间接的费用。断路器设备损失成本与电压等级和故障损失程度有一定的关系，在风险评估时需区分计算。设备损失成本故障后果设定如表1所示。

表1 设备损失成本故障后果设定

电压等级/kV	小型故障	中等故障	重大故障	拒动故障
10	OP_{11}	OP_{12}	OP_{13}	OP_{14}
35	OP_{21}	OP_{22}	OP_{23}	OP_{24}
110	OP_{31}	OP_{32}	OP_{33}	OP_{34}
220	OP_{41}	OP_{42}	OP_{43}	OP_{44}
500	OP_{51}	OP_{52}	OP_{53}	OP_{54}

断路器损失成本风险故障后果计算公式为

$$CF_{OP}=\sum_{j=1}^{4}OP_{ij} \tag{5}$$

式中，CF_{OP}为设备损失成本风险的故障后果；i表示电压等级；j为1、2、3和4，分别代表小型、中等、重大和拒动故障。

设备损失成本的修正系数也包含了各种状态量，本文主要考虑了生产厂家类型、配件获取难易等级和变电站大型检修/施工的交通便利等级等。设备损失成本修正系数的计算公式为

$$CA_{OP}=\frac{f_1f_2f_3}{\text{average}(\sum_1^i f_1f_2f_3)} \tag{6}$$

式中，CA_{OP}为设备损失成本风险的修正系数；f_1为生产厂家类型系数；f_2为配件获取难易等级系数；f_3为变电站大型检修/施工的交通便利等级系数。

设备损失成本风险是根据设备损失成本风险的故障后果、相应的修正系数以及故障发生概率计算得到，断路器设备损失成本风险的计算公式为

$$R_{OP}=\sum_{i=1}^{4}CF_{OP}CA_{OP}FR \tag{7}$$

1.3 人身安全风险的计算

人身安全风险是指设备故障或事故时可能对运行、维护或社会人员造成的威胁。本文将人身安全分为人员轻伤、人员重伤以及人身死亡三个等级。通过分析以往案例和相关法律法规的条款，对各人身安全等级的故障后果进行设定。考虑到并不是每次故障或者事故都会造成人身伤害，并且，不同故障类型下，可能造成人身伤害的概率也不一样，因此，还需要分析并设定各人身安全等级在不同故障类型下的发生概率。

表2 人身安全损失值设定

类别	损失值
人员轻伤	S_1
人员重伤	S_2
人身死亡	S_3

表3 人身安全各等级概率设定

类别	小型故障	中等故障	重大故障	拒动故障
人员轻伤概率	F_{SA11}	F_{SA12}	F_{SA13}	F_{SA14}
人员重伤概率	F_{SA21}	F_{SA22}	F_{SA23}	F_{SA24}
人身死亡概率	F_{SA31}	F_{SA32}	F_{SA33}	F_{SA34}

从表2和表3可以计算得到各故障类型下人身安全故障后果，计算公式为

$$CF_{SA}=\sum_{i=1}^{3}\sum_{j=1}^{4}S_iF_{SAij} \tag{8}$$

式中，CF_{SA}为人身安全故障后果；i为1、2和3，分别代表人员轻伤、重伤和死亡。

本文人身安全故障后果修正系数主要考虑设备所处运行环境的安全等级，人身安全故障后果修正系数的计算公式为

$$CA_{SA}=\frac{f}{\text{average}(\sum_1^i f)} \tag{9}$$

式中，CA_{SA}为人身安全风险故障后果修正系数；f为设备运行环境安全等级。

断路器人身安全风险是根据人身安全风险的故障后果、相应的修正系数以及故障发生概率计算得到，断路器人身安全风险计算公式为

$$R_{SA}=\sum_{i=1}^{4}CF_{SA}CA_{SA}FR \tag{10}$$

1.4 环境影响风险的计算

环境影响风险是指设备发生故障或事故后，可能给环境带来的各种污染或干扰，例如气体泄漏、火灾、固体废弃物以及社会影响等。目前，我国还未有成熟的法律法规可以借鉴，但环

中国知网 https://www.cnki.net

境保护又是在今后的可持续发展当中不可回避的因素，因此，本文通过分析过去发生的案例以及国外在此方面的规定进行环境影响故障后果的设定。

考虑到并不是每次故障或者事故都会对环境造成影响，因此，同样分别从电压等级、故障类型下的发生概率进行设置。

表4 环境影响损失值设定

类别	损失值
SF_6泄漏（/Kg）	EN_1
火灾（/起）	EN_2
固体垃圾（/T）	EN_3
社会影响	EN_4

表5 环境影响各类别概率设定

类别	小型故障	中等故障	重大故障	拒动故障
SF_6泄漏概率	F_{EN11}	F_{EN12}	F_{EN13}	F_{EN14}
火灾概率	F_{EN21}	F_{EN22}	F_{EN23}	F_{EN24}
固体垃圾概率	F_{EN31}	F_{EN32}	F_{EN33}	F_{EN3}
社会影响概率	F_{EN41}	F_{EN42}	F_{EN43}	F_{EN44}

从表4和表5可以计算得到各故障类型下环境影响故障后果，计算公式为

$$CF_{EN}=\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{4}EN_iF_{ENij} \tag{11}$$

式中，CF_{EN}为各故障类型的人身安全故障后果；i为1、2、3和4，分别代表环境类别。

环境影响修正系数依据断路器的SF_6气重或油重进行修正，其计算公式为

$$CA_{EN}=\frac{f}{\text{average}(\sum_{1}^{i}f)} \tag{12}$$

式中，CA_{EN}为环境影响风险故障后果修正系数；f为SF_6气重或油重系数。

断路器环境影响风险是根据环境影响风险的故障后果、相应的修正系数以及故障发生概率计算得到，断路器环境影响风险计算公式为

$$R_{EN}=\sum_{i=1}^{4}CF_{EN}CA_{EN}FR \tag{13}$$

2 案例分析

本文以都匀供电局6个变电站的断路器实际数据进行风险评估，计算得到每一台断路器的风险以及断路器组的总风险。如表6所示。风险汇总如图4所示。

表6 单台断路器当前风险

设备	电压等级	R_{NP}	R_{SA}	R_{OP}	R_{EN}	RISK	FR
福泉变电站5012CB	500	62 962	1 151	22 420	1 093	87 626	0.067 3
福泉变电站5042CB	500	251 848	1 151	22 420	1 093	276 511	0.067 3
福泉变电站214CB	220	13 729	1 196	5 664	908	21 496	0.069 9
福泉变电站202CB	220	79 669	3 469	16 434	2 195	101 767	0.202 8
福泉变电站209CB	220	26 437	1 151	8 180	729	36 496	0.067 3
福泉变电站132CB	110	67 358	2 933	13 894	1 856	86 042	0.171 5
福泉变电站110CB	110	54 794	1 193	5 651	755	62 393	0.069 7
都匀变电站106CB	110	18 547	1 151	8 180	729	28 606	0.067 3
沙变变电站301CB	35	27 845	1 151	5 453	729	35 178	0.067 3
洛邦变电站302CB	35	3 281	1 151	5 453	729	10 614	0.067 3
东山变电站005CB	10	5 417	1 151	5 453	729	12 750	0.067 3
洛邦变电站002CB	10	3 281	1 151	5 453	729	10 614	0.067 3

其中：R_{NP}为负荷损失风险；R_{SA}为人身安全风险；R_{OP}为设备损失成本风险；R_{EN}为环境影响风险；RISK为风险；FR障发生概率。

表7 单台断路器未来第10年风险

设备	电压等级	R_{NP}	R_{SA}	R_{OP}	R_{EN}	RISK	FR
福泉变电站5012CB	500	174 814	3 196	62 248	3 034	243 293	0.186 9
福泉变电站5042CB	500	251 848	1 151	22 420	1 093	276 511	0.067 3
福泉变电站214CB	220	35 077	3 055	14 471	2 320	54 923	0.1786
福泉变电站202CB	220	210 873	9 182	43 497	5 811	269 362	0.5368
福泉变电站209CB	220	26 437	1 151	8 180	729	36 496	0.067 3

中国知网 https://www.cnki.net

（续）

设备	电压等级	R_{NP}	R_{SA}	R_{OP}	R_{EN}	RISK	FR
福泉变电站132CB	110	162 892	7 093	33 600	4 489	208 074	0.414 7
福泉变电站110CB	110	154 400	3 361	15 924	2 127	175 813	0.196 5
都匀变电站106CB	110	18 547	1 151	8 180	729	28 606	0.067 3
沙变电站变电站301CB	35	79 439	3 284	15 557	2 078	100 359	0.192 0
洛邦变电站302CB	35	3 281	1 151	5 453	729	10 614	0.067 3
东山变电站005CB	10	12 820	2 724	12 905	1 724	30 173	0.159 3
洛邦变电站002CB	10	3 281	1 151	5 453	729	10 614	0.067 3

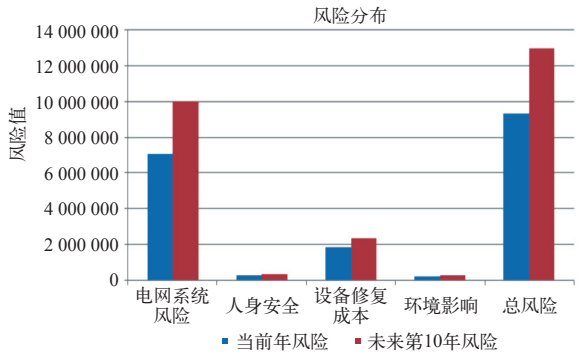

图4　参与评估的所有断路器风险汇总

由表6、表7可以看到单台断路器当前风险及未来的风险变化情况，包括各个风险类别的子风险。图4为此次参与评估的所有断路器的总体风险汇总结果，从中可以看到负荷损失风险占断路器总风险的比重很大，是断路器总风险的主要组成部分。

断路器风险值越大代表其发生故障所导致的后果越大，通过上述评估可以看出哪些设备的风险值比较大，可以对这些断路器着重进行关注或者进行检修。同时，对于同电压等级的设备，也可以判断哪些断路器处于高风险状态。断路器的风险评估从经济学的角度为断路器检修提供支持。同时，断路器风险还可以结合断路器状态评价结果进行检修计划的制定。

3　结束语

本文详细阐述了断路器负荷损失风险、设备损失成本、人身安全和环境影响四个方面风险以及总风险的计算方法，从而计算得到每一台断路器的风险及其变化趋势。从风险的角度出发，把握断路器的运行风险状态，并且，通过实际评估，验证了方法的准确性，为断路器的安全稳定运行提供支撑，为断路器检修计划的制定提供技术支持，并对断路器开展状态检修具有良好的社会效益和经济效益。

参考文献

[1] 宦伏天，米彬彬．SF6断路器的在线监测与状态检修技术 [J]．电气开关，2013 (4)：5-6．

[2] 高凌霄．SF6断路器检修技术探讨 [J]．山东工业技术，2014 (3)．

[3] 吴杰余．电气设备状态检修中断路器状态监测及保护集成化研究 [D]．武汉：华中科技大学，2002．

[4] 张成林，王克英．变电设备状态检修现状与展望 [J]．供用电，2006，23 (6)：1-3．

[5] 徐淑文，李志刚，韩旭．输变电设备状态检修辅助决策系统研究 [J]．山东电力技术，2010 (6)：14-18．

[6] 潘乐真，鲁国起，等．基于风险综合评判的设备状态检修决策优化 [J]．电力系统自动化，2010，34 (11)：28-32．

[7] 韩晓霞，李莉，麻海燕，等．关于电力设备状态检修技术的研究 [J]．青海电力，2006，25 (1)：13-16．

[8] 董宪军．电气设备状态维修策略研究 [R]．企业技术开发：学术版，2009，28 (2)．

[9] 李葆文．国外设备管理模式及发展趋势 [J]．设备管理与维修，2000 (7)．

[10] 许跃军．设备风险等级评定与检修策略优化 [J]．电力设备，2005，6 (4)：73-75．

[11] PASS55-1：2004，Asset Management [S]．BSI 30 April 2004．

（收稿日期：2015－01－07）EA

中国知网 https://www.cnki.net