

DOI: 10.7500/AEPS201210117

计及电力安全事故责任的稳定控制系统风险管理

刘福锁¹, 李威¹, 方勇杰¹, 马覃峰², 薛峰¹, 李兆伟¹

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106;

2. 贵州电网公司电力调度控制中心, 贵州省贵阳市 550002)

摘要:《电力安全事故应急处置和调查处理条例》的实施明确了稳定控制系统切负荷等同于故障损失负荷,对电网运行和稳定控制系统管理提出了更高要求。将先进的风险管理理念引入稳定控制系统配置和日常运行管理,梳理了稳定控制系统的风险因素及其后果,通过将电力安全事故责任代价转化为可承受的经济损失代价期望,提出了涵盖国民经济损失、电力安全事故法律责任和罚款损失的稳定控制系统风险评价指标。在此基础上,提出了基于风险的稳定控制系统配置方案决策和风险管理方法,利用风险代价不能大于风险转移代价的标准表征稳定控制系统风险承受能力,提出基于风险代价和风险转移代价之和最小原则的稳定控制系统风险应对策略优化方法,以实际算例证明该方法可降低电力系统运行风险。

关键词: 风险管理; 稳定控制系统; 电力安全事故; 评价指标; 策略优化

0 引言

按照 DL/T 26399—2011《电力系统安全稳定控制技术导则》的规定^[1]:为保证电力系统承受第二类大扰动时的安全,可由安全稳定控制系统(装置)执行紧急控制,防止稳定破坏和参数严重越限。目前,稳定控制(简称稳控)系统在中国多个区域电网和联网工程中得到了实际应用^[2],为保证电网安全稳定运行发挥了积极作用。根据电力系统安全稳控三道防线指导思想,针对稳控系统的研究主要集中在防止控制策略失配、拒动和误动等方面^[3-4],以保证严重故障下的电网安全稳定运行。在电网运行调度层面,通常将已投运稳控系统作为既定模型,将关键断面控制在运行极限以下,缺乏风险意识。

《电力安全事故应急处置和调查处理条例》^[5](以下简称“条例”)对电力行业的安全事故分级进行了大幅调整,明确了可造成电力事故安全风险的主要因素,明确了稳控系统切负荷等同于故障损失负荷,对稳控系统的配置和管理提出了新的要求,在保障电网安全稳定运行的前提下,应强化分析配置稳控系统带来的风险。近年来,风险理论被用于电力系统的安全评估^[6-8]和电力市场风险管理^[7-10]等多个方面,取得了较好的研究成果。国家电网公司也正在积极借鉴和吸收国际上先进的安全管理理念和

方法,将风险管理引入电力企业安全管理中,并下发了《关于推进安全风险管理体系建设的意见》^[11]。针对稳控系统的风险管理还没有得到足够的重视,亟须开展深入研究。

本文从分析稳控系统动作导致电力安全事故风险入手,提出了涵盖国民经济损失、电力安全事故法律责任和罚款损失的稳控系统风险评价指标。在风险量化评估基础上,提出了计及电力安全事故风险的稳控系统配置方案决策和风险管理方法。

1 稳控系统风险管理的概念

风险可以定量表示为不确定事故发生概率与不确定事故造成的后果的乘积^[12]。风险管理的内容包括风险识别、风险分析、风险监控和风险应对等环节^[13]。稳控系统风险管理指的是该系统的使用单位(电网公司)通过对使用稳控系统而产生的风险进行识别、衡量和分析,进而实现风险控制的过程。以一种系统的方式检查由于稳控系统的使用而产生的风险,从而选择合适的应对策略。

2 稳控系统风险识别

对于稳控系统使用者电网公司而言,稳控系统的主要风险包括产品质量风险、技术风险、经济风险和责任风险。产品质量风险指的是由于稳控系统质量问题所带来的潜在风险,可导致稳控系统的拒动和误动;技术风险包括稳控系统控制配置方案、策略制定等方面,由于技术原因导致稳控系统存在缺陷

收稿日期: 2012-10-15; 修回日期: 2013-08-22。

国家电网公司资助项目(SGCC-MPLG003-2012);已申请国家发明专利(申请号:201210149860.2)。

所引入的如稳控策略失配等潜在风险;经济风险为稳控系统动作切机切负荷而带来的国民经济损失;责任风险为稳控系统动作切负荷导致电力安全事故,电网公司要承担的法律风险。

纵观稳控系统 4 种类型风险因素导致的结果,对于电网公司,使用稳控系统带来的风险主要体现在稳控系统执行紧急控制带来的经济损失风险和电力安全事故责任风险。

3 稳控系统风险的量化分析

3.1 稳控系统动作代价

3.1.1 经济代价

1) 常规经济损失

稳控系统动作切负荷导致的代价用单位停电费用损失乘以期望缺供电量来计算。单位停电费用损失通常有 3 种计算方法^[14]:基于用户函数法、基于投资核算法和基于国民生产总值的方法。针对中国的特点,建议采用电网供电范围内(通常以省为单位)的国民生产总值和该地区的年用电量的比值,即单位电量的价值来从整体上考虑总的经济损失代价,可用该代价统一考虑电网公司的损失和公司外经济体的损失。

稳控系统动作导致的常规经济损失为:

$$W_1 = f(X) = p \Delta P t \quad (1)$$

式中: ΔP 为稳控系统动作的切负荷量; t 为稳控系统切除负荷的停电时间; p 为单位停电费用损失。

2) 行政罚款代价

根据条例,行政罚款数额由电力安全事故等级决定。发生一般事故罚款在 10 万元以上、20 万元以下;发生较大事故罚款在 20 万元以上、50 万元以下;发生重大事故罚款在 50 万元以上、200 万元以下;发生特别重大事故罚款在 200 万元以上、500 万元以下。稳控系统动作导致电力安全事故的等级主要由切负荷量占所在电网总负荷比例,即负荷损失比例 λ 所决定。针对不同等级电网,导致相同等级的电力安全事故的切负荷量不同,需根据不同类型电网制定不同的行政罚款代价函数。如区域性电网的罚款代价如式(2)所示,其他类型电网的行政罚款函数代价,可根据条例按照式(2)修订。

$$W_2 = h(X) = \begin{cases} 20 \text{ 万元} & \lambda \in (4\%, 7\%] \\ 50 \text{ 万元} & \lambda \in (7\%, 10\%] \\ 200 \text{ 万元} & \lambda \in (10\%, 30\%] \\ 500 \text{ 万元} & \lambda \in (30\%, 100\%] \end{cases} \quad (2)$$

3.1.2 电力安全事故责任代价

条例将电力安全事故分为一般事故、较大事故、重大事故和特别重大事故共 4 个等级。针对一个特

定电网(区域、省、含区的市、县级市等),均严格定义了导致各等级事故的 λ 范围(x, y]。责任代价随着 λ 增加呈阶梯形分布,如图 1 所示。

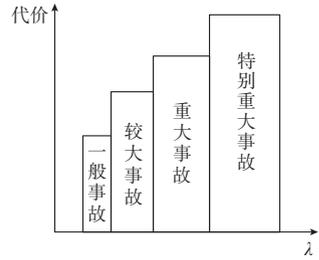


图 1 电力安全事故责任代价
Fig.1 Liability cost of electrical security accident

要实现风险代价量纲的统一,需将法律责任代价用经济带来描述。利用可承受的经济损失代价期望值可近似描述电力安全事故责任代价,本文利用导致某一等级安全事故的损失负荷量的均值所导致的经济代价来表征承担该等级安全事故责任代价。假设损失比例(x, y]内的负荷导致某一等级电力安全事故,则导致该等级电力安全事故责任代价为:

$$W_3 = g(X) = \frac{p(x+y)Pt}{2} \quad (3)$$

式中: P 为考核区域内的总负荷。

3.1.3 稳控系统动作总代价

稳控系统动作总代价由常规经济损失代价、电力安全事故责任代价和行政罚款代价之和组成,即

$$W_{\text{total}} = W_1 + W_2 + W_3 \quad (4)$$

稳控系统动作导致的 W_1 为关于切负荷导致缺供电量的单调递增函数。稳控系统动作切负荷导致的 W_2 和 W_3 均为分段阶跃函数,且边界条件一致。不难证明,稳控系统动作总代价为如图 2 所示的分段线性函数,具有代价随切负荷量增加而增大的单调特性。

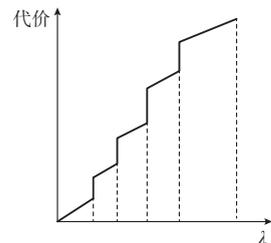


图 2 稳控系统切负荷代价函数
Fig.2 Risk cost of load shedding by stability control system

3.2 稳控系统风险量化评价指标

定义稳控系统动作的风险指标如下:

$$R = (\alpha + \beta)(W_1 + W_2 + \gamma W_3) \quad (5)$$

式中: α 为稳控系统正常动作导致切负荷的概率; β 为稳控系统误动导致切负荷的概率; γ 为电力安全事故责任代价调节因子,根据事故等级范围及可承受性,进行比例调整。

利用导致某一等级电力安全事故的平均损失负荷量的经济代价来表征该等级电力安全事故责任代价,解决了稳控系统动作代价量纲统一问题,但未能反映不同电网公司对风险代价的承受程度。通过在风险指标中设置调节因子可反映电网公司对电力安全事故风险的不同承受能力。针对不同等级的电力安全事故责任,可设置不同的调节因子参数。实际中,人们更不愿发生高等级电力安全事故,高等级电力安全事故责任代价的调节因子要大于较低等级电力安全事故责任代价的调节因子。因此,在风险指标公式中引入调节因子参数,不会改变风险指标关于负荷损失量的单调性。

导致稳控系统动作包括两种情况:一是发生了考核故障且运行方式满足设定条件触发控制系统动作;二是系统误动。稳控系统正常动作概率等于满足动作条件的方式概率和考核故障发生概率的乘积。方式概率和故障概率均可采用文献[15]介绍的成熟算法。稳控系统误动导致切负荷的概率可采用运行记录数据中的稳控系统误动频率统计值。

4 稳控系统风险控制

稳控系统的风险控制包括稳控系统风险配置和已投运稳控系统的风险管理两个部分。

4.1 基于风险的稳控系统配置决策

基于风险观念,当某个控制措施的代价小于采用它可使事件风险降低的值时,该措施可作为应对事件的选项^[16]。预防控制和紧急控制是保证预想故障下电网安全稳定运行的主要手段。稳控系统配置决策除了满足紧急控制代价小于系统风险降低值外,还应小于采用预防控制的代价。

稳控系统配置方案的考核周期通常取1年,包含若干典型方式。方式 i 的概率可用该方式持续时间 T_i 占总时间 T 的比例来表示。假设共有 n 个典型方式,第 i 个典型方式电网的负荷总量为 P_i ,发生预想故障(概率为 ϵ_i)导致系统损失负荷 ΔP_i ,若采用稳控系统执行紧急控制需切负荷 ΔP_{qi} 。

配置稳控系统的风险按下式计算:

$$R_1 = \sum_{i=1}^n \frac{T_i}{T} \epsilon_i (W_{1i} + W_{2i} + \gamma_i W_{3i}) \quad (6)$$

式中: γ_i 为对应事故等级的条件因子; W_{1i} 、 W_{2i} 、 W_{3i} 分别为第 i 个方式故障下,稳控动作导致的经济代价、行政罚款和法律代价,分别按式(1)、式(2)、

式(3)计算。

减少稳控系统切负荷量的预防控制指的是有功功率预防控制,主要通过减少送端机组出力和受端负荷等手段来降低关键断面输送功率,提高了电网安全稳定水平,但该方法同时牺牲了电网的运行经济性。因此,本文定义利用预防控制保证电网安全稳定运行的风险,包括限制负荷用电导致的国民经济损失和电网公司因减少供电导致的经济损失,即

$$R_2 = \sum_{i=1}^n A \quad (7)$$

其中

$$A = \begin{cases} \frac{T_i}{T} (P_{di} - P_{maxi})(k + \tau) T_i & P_{di} > P_{maxi} \\ 0 & P_{di} \leq P_{maxi} \end{cases} \quad (8)$$

式中: P_{di} 为关键断面输送功率; P_{maxi} 为方式 i 下关键断面输电极限; k 为限制单位供电量造成的国民经济损失; τ 为电网公司单位电量的收益。

4.2 投运稳控系统的风险控制

4.2.1 风险跟踪和评估

稳控系统的特殊性决定其只能通过风险转移来进行风险控制。采用预防控制降低电网传输功率、减少稳控系统动作概率或者减少切负荷量是风险转移的主要途径。由于针对当前方式进行计算,方式概率为1,可根据式(9)计算当前方式下的稳控系统的风险代价:

$$R_3 = (\alpha + \beta) [W_1 + W_2 + \gamma W_3] \quad (9)$$

风险转移的代价与降低风险所采取的预防控制的控制量和控制时间有关,即

$$R_4 = (P_d - P_{max})(k + \tau) T_d \quad (10)$$

式中: P_{max} 为不配备稳控系统时考核断面的输送极限; P_d 为当前方式下的考核断面功率; T_d 为预防控制持续时间。

当稳控系统风险代价大于风险转移代价时,判断稳控系统风险不可承受,需进行风险控制。

4.2.2 风险控制策略计算

以稳控系统风险代价及风险转移代价之和最小为优化目标^[17],进行风险控制策略搜索。其数学模型如下:

$$\begin{cases} \min(R_3 + R_4) \\ \text{s.t. } \mathbf{f}(\mathbf{X}_T) = \mathbf{0} \\ \mathbf{h}(\mathbf{X}_T, \mathbf{e}) > \mathbf{0} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{f}(\mathbf{X}_T) = \mathbf{0}$ 为系统运行的等式约束,如潮流方程等; $\mathbf{h}(\mathbf{X}_T, \mathbf{e}) > \mathbf{0}$ 为不等式约束,包括控制量的容量限制、系统安全稳定裕度等要求,以及预防控制风险代价小于紧急控制风险代价等限制条件。

控制措施中,除传统的调整机组出力 and 减负荷外,还应重点考虑动态分负荷功能,尽量在保证负荷最大供电基础上,提高系统安全性、降低系统风险。

5 应用算例

以图3所示某220 kV设区的市级电网为例,介绍稳控系统风险管理方法的应用。

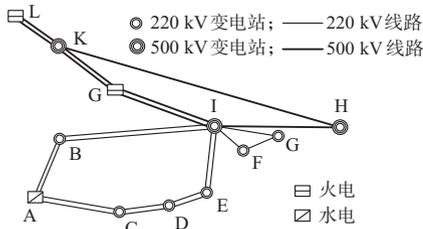


图3 某实际区域电网地理接线图
Fig.3 Geographic diagram of an actual distributed power grid

该区域电网通过500 kV变电站I与主网相连,通常从主网受入电力,故障导致孤网后存在频率安全问题。基于4种年度典型方式,研究稳控系统的配置技术方案为:发生导致该地区孤网的故障时,采取切负荷50 MW的策略可保证系统安全运行,最大可切负荷量为320 MW。

5.1 配置方案的风险决策

4种典型方式下的负荷总量、区域电网受入功率、导致区域孤网的概率和故障后切负荷情况如表1所示。根据条例,供电区域为设区的市级电网减供负荷20%以上、40%以下,将导致一般电力安全事故,罚款20万元。

表1 典型方式和稳控系统切负荷定值
Table 1 Typical operation mode and definite value of security and stability control system

方式	持续时间	总负荷/ MW	受电量/ MW	故障后切 负荷量/ MW	λ /%	故障 概率
1	3个月	960	250	200	20.83	0.05
2	3个月	960	370	320	33.33	0.05
3	3个月	750	160	110	14.66	0.05
4	3个月	750	250	200	26.66	0.05

不考虑稳控系统误动,风险计算的边界条件为:
①稳控系统切负荷导致的停电时间期望为1 h,单位停电损失为60元/(kW·h);
②电力安全事故责任代价调节因子取2.0;
③限制单位供电损失取0.5元/(kW·h);
④电网公司单位电量的收益取0.05元/(kW·h)。

根据式(6)计算可得,配置切负荷50 MW、总负荷320 MW的稳控系统下的系统风险 $R_1 =$

183万元。采用限制该区域电网下网功率的预防控制手段来保证电网在预想故障下的安全稳定性,将下网功率控制在50 MW。根据式(7)、式(8)计算可得,采用预防控制下的系统风险 $R_2 = 2.49$ 亿元。

可见,针对该区域电网,配置上述稳控系统下的风险远小于采用预防控制下的风险。从风险决策角度考虑,应当通过配置稳控系统来提高系统供电能力和安全稳定运行水平。

5.2 稳控系统的风险控制

电力系统实际运行过程中,运行方式和典型方式不尽相同,需实时监控稳控系统风险,必要时需进行风险控制。例如:当系统处于如下方式,即总负荷650 MW,受电250 MW,预计持续时间2 h时,对于故障导致的系统孤网,需切负荷200 MW。

根据式(9)计算可得该方式下的稳控系统风险 $R_3 = 178$ 万元;根据式(10)计算可得该方式下稳控系统的风险转移代价 $R_4 = 82$ 万元。

可见,在该方式下稳控系统风险代价大于风险转移代价,判断稳控系统投运增加了电力系统运行风险,需进行风险控制。

根据式(11)的优化模型,在机组出力不可调情况下,需通过转移负荷或减负荷手段,将该地区负荷总量控制在562.5 MW,使系统风险降低到最小,为35.87万元。

6 结语

本文结合电力安全事故应急处置和调查处理条例,研究了计及电力安全事故风险的稳控系统风险评价指标,提出了按照风险代价评估稳控系统配置可行性,以及基于风险代价和风险转移代价之和最小原则的风险应对策略方法。研究证明,采用该风险控制方法可大大降低系统运行风险,为研究在新环境下的电网运行控制,提供了技术支撑。

本文提出的风险指标建模思路和方法,可应用于系统中因其他因素导致的电力安全事故风险研究,具有一定的借鉴意义。

参考文献

[1] DL/T 26399—2011 电力系统安全稳定控制技术导则[S].北京:中国标准出版社,2011.
[2] 宋锦海,李雪明,姬长安,等.安全稳定控制装置的发展现状及展望[J].电力系统自动化,2005,29(23):91-96.
SONG Jinhai, LI Xueming, JI Changan, et al. Current situation and development prospect of security and stability control equipment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(23): 91-96.
[3] 方勇杰.跨区互联电网紧急控制技术未来发展分析[J].电力系统自动化,2011,35(15):1-5.

- FANG Yongjie. Analysis on trends in emergency control technology of cross-regional inter connected power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 1-5.
- [4] 方勇杰. 模型不确定性对自适应闭环紧急控制设计影响的探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 49-53.
- FANG Yongjie. Discussion on influence of model uncertainties on closed-loop adaptive stability control design[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 49-53.
- [5] 电力安全事故应急处置和调查处理条例[M]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [6] 薛禹胜, 刘强, DONG Z Y, 等. 关于暂态稳定不确定性分析的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 1-6.
- XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Z Y, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.
- [7] 陈为化, 江全元, 曹一家. 基于风险理论和模糊推理的电压脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(24): 20-25.
- CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Voltage vulnerability assessment based on risk theory and fuzzy reasoning[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(24): 20-25.
- [8] 陈为化, 江全元, 曹一家, 等. 电力系统电压崩溃的风险评估[J]. 电网技术, 2005, 29(19): 6-11.
- CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia, et al. Risk assessment of voltage collapse in power system [J]. Power System Technology, 2005, 29(19): 6-11.
- [9] 赖业宁, 薛禹胜, 王海风. 电力市场稳定性及其风险管理[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 18-24.
- LAI Yening, XUE Yusheng, WANG Haifeng. Electricity market stability and its risk management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 18-24.
- [10] 汤振飞, 于尔铿, 唐国庆, 等. 基于风险管理的电力市场安全服务定价[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(24): 18-24.
- TANG Zhenfei, YU Erkeng, TANG Guoqing, et al. Power market security service pricing based on risk management [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(24): 18-24.
- [11] 卢国伟. 电力企业安全风险管理概述[J]. 电力安全技术, 2012, 14(3): 5-8.
- [12] BOOTH C J. New IEEE standard dictionary of electrical and electronic terms[M]. 5th ed. 1993.
- [13] LI Wenyuan. 电力系统风险评估模型、方法和应用[M]. 周家启, 卢继平, 胡小正, 等译. 北京: 科学出版社, 2010.
- [14] LI Wenyuan. Methods for determining unit interruption cost [R]. 2000.
- [15] WILLIAMS C A, SMITH M L, YOUNG P C. 风险管理与保险 [M]. 马从辉, 刘国翰, 译. 北京: 经济科学出版社, 2002.
- [16] 薛禹胜, 肖世杰. 综合防御高风险点小概率事件: 对日本相继天灾引发大停电及核泄露事件的思考[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-11.
- XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [17] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-4.
- XUE Yusheng. Coordinations of preventive control and emergency control for transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 1-4.

刘福锁(1981—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要研究方向: 电力系统安全稳定分析与控制. E-mail: liufusuo@sgepri.sgcc.com.cn

李 威(1976—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统安全稳定分析与控制. E-mail: liwei10@sgepri.sgcc.com.cn

方勇杰(1964—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向: 电力系统安全稳定分析与控制. E-mail: fangyongjie@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 章黎)

Risk Management of Stability Control System Considering Electrical Security Accidents Responsibility

LIU Fusuo¹, LI Wei¹, FANG Yongjie¹, MA Qinfeng², XUE Feng¹, LI Zhaowei¹

(1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;

2. Guizhou Electric Power Grid Dispatching & Control Center, Guiyang 550002, China)

Abstract: Higher requirements are made for the management of stability control system by Ordinances of Electrical Security Accident Emergency Disposal and Investigation, which makes it clear that load shedding by stability control system is equivalent to the loss of load under faults. The advanced risk management concept is introduced into the stability control system configuration and daily management. The risk assessment index of stability control system is put forward including economic loss, legal liability of electrical security accident and penalty loss. The legal liability of electrical safety accident is converted to an affordable economic loss cost. On this basis, the decision-making method of stability control system configuration and risk management are proposed. The stability control system risk tolerance is characterized by the criterion that the risk cost must be less than the risk transfer price. The optimization algorithm of stability control system risk management is proposed based on the principle that the sum of risk cost and risk transfer cost should be minimum. That the risk management method can greatly reduce the operation risk of power system is verified by an actual power system.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. SGCC-MPLG003-2012).

Key words: risk management; stability control system; electrical safety accident; assessment index; strategy optimization