

基于概率不安全指标的暂态风险评估

唐晓玲, 李丕意, 潘佩芳

(温州电力局, 浙江 温州 325000)

摘要: 电力系统规模的不断扩大和电力市场改革的进一步推进, 给电力系统的安全稳定运行构成了威胁, 因此对电力系统进行暂态稳定评估, 了解系统真实的运行状况, 具有重要的现实意义。以动态安全域为分析手段, 提出了基于概率不安全指标的暂态风险评估模型, 兼顾了电力系统运行的安全性和经济性, 将系统的运行状况量化为一个经济指标。IEEE 4机11节点系统算例说明了该模型的有效性。

关键词: 电力系统; 概率不安全指标; 风险; 暂态评估

Transient risk assessment based on probabilistic insecurity index

TANG Xiao-ling, LI Pi-yi, PAN Pei-fang

(Wenzhou Electricity Power Bureau, Wenzhou 300072, China)

Abstract: The expanding of power system and the power marketing reformation are both threatening the security of the power system. Thus, it is of practical significance to make a transient stability assessment of the power system. A new transient risk assessment model based on dynamic security region (DSR) is presented in this paper, which can balance security and economy and convert the operating condition into an economic index. The result of IEEE 4-generator 10-bus test system shows the validity of the model.

Key words: power system; probabilistic insecurity index; risk; transient assessment

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0045-05

0 引言

当前, 世界各国电力系统的发展趋势是大规模联网运行: 系统负荷不断增加、各互联区域间的功率传输越来越频繁、传输量越来越大。电网规模的不断扩大, 带来了巨大的经济效益, 同时为电力系统的安全运行埋下了隐患。网络互联使电力系统动态行为更加复杂, 即使一个微小的局部故障也可能导致大规模的系统停电, 造成巨大的经济损失。因此对电力系统的安全性、稳定性进行深入研究, 对系统的运行风险进行评估具有重要的现实意义。

系统暂态稳定分析的主要方法分确定性分析和概率性分析两种^[1]。确定性分析物理意义清晰, 但在分析过程中忽略了系统运行的复杂性和随机性, 难以提供准确的电网运行信息以建立有效的控制和决策支持系统, 无法满足电力市场的要求, 往往造成电力资源的浪费。相比而言, 概率性分析方法综合考虑了电力系统及其事件的不确定性的本质, 更真实地反映系统的暂态稳定性。文献[2]指出电力系统概率稳定分析的任务是根据影响稳定的主要随机

因素的统计特性来确定系统的稳定性概率指标, 文献[3]基于动态安全域的研究成果, 提出了输电系统概率不安全水平的量化指标。该概率指标计及了系统的负荷波动、系统发生的故障类型、故障发生地点的随机分布和发生故障时系统接地电阻的概率分布对系统安全性的影响, 并结合动态安全域的概念和方法, 对系统的概率不安全水平给出量化评价。文献[4]提出了暂态稳定风险评估的概念, 综合考虑故障发生的概率及其严重性后果, 分析暂态失稳后果的各种估计方法, 同时通过对每个运行点进行仿真求得暂态失稳概率, 最终得到系统暂态稳定风险。

本文利用动态安全域的分析手段, 借助概率不安全指标模型, 提出了一种新的暂态风险评估模型。该模型综合考虑了故障的发生、故障类型、故障发生地点、故障清除时间、故障电阻和系统运行状况等不确定信息, 兼顾了电力系统运行的安全性和经济性, 对系统的暂态稳定风险进行定量评估, 能够真实地反映系统所处的风险水平, 为系统运行人员提供有效的参考信息。

1 电力系统概率不安全指标

1.1 电力系统动态安全域

电力系统动态安全域 (DSR) 是定义在节点注入功率空间上的集合^[5], 对于域中的任何一个点, 在发生给定故障后均可保证系统的暂态稳定性。判断一个系统运行点是否安全只需判断该点是否位于 DSR 内即可。研究表明, DSR 可由描述各节点注入功率上、下限的垂直于坐标轴的超平面和少数几个描述暂态稳定性临界点的超平面围成, 每个超平面对应于一种失稳模态^[6,7], 可用式 (1) 表示:

$$\sum_{j=1}^n a_j y_j = 1 \quad (1)$$

其中: y_j 是节点 j 的临界注入功率, a_j 是所求得的超平面系数。

1.2 影响电力系统暂态稳定性的随机因素

1) 故障事件的发生

文献[8]提出故障事件的发生可以用故障率为常数的泊松分布来模拟的故障。根据泊松分布, 在时间 t 内不发生故障的概率为:

$$P_{no} = e^{-\lambda_0 t} \quad (2)$$

式中: P_{no} 是不发生故障的概率; λ_0 是平均故障率; t 是考察的时间区间。

因此, 时间 t 内发生故障的概率为:

$$P_o = 1 - e^{-\lambda_0 t} \quad (3)$$

2) 故障类型

事故空间存在四种相互独立的事故类型: 三相接地、两相接地、相间短路和单相接地。从历史数据可得, 对于特定线路, 类型 $F = n$ 故障发生的频率是 f_n , 则其发生的概率可用下式表示:

$$P_n = \frac{f_n}{\sum_{i=1}^4 f_i} \quad n=1,2,3,4 \quad (4)$$

3) 故障点的位置

分析输电线路的地理信息, 如森林地区, 可能发生树闪; 平原地区的输电线路可能比城市的架空线路更容易遭受闪电等。根据分析结果和历史数据, 建立准确的离散概率分布的故障点位置模型, 将线路分为 M 段, 在 i 段发生故障的概率为:

$$P_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^M f_i} \quad (5)$$

式中: f_i 是第 i 段发生故障的次数。

4) 故障清除时间

故障清除时间近似服从正态分布, 为了减少计算量, 可用离散的截断正态分布曲线将故障清除时间描述为 N 个时间间隔相同的时间段。

5) 故障电阻

故障电阻可以假设为服从参数 μ 和 σ 的对数正态分布, 即:

$$f_r(r) = \begin{cases} \frac{1}{r\sqrt{2\pi\sigma}} e^{-\frac{(\ln r - \mu)^2}{2\sigma^2}}, & r > 0 \\ 0, & r \leq 0 \end{cases} \quad (6)$$

为了方便计算, 可将该分布离散化。

6) 故障前的系统运行点

根据大量的统计结果显示, 系统在未来某个运行时刻 t , 各节点有功功率注入可以视为正态分布, 即 $p_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ 。负荷节点注入的期望值可以由短期负荷预测得到, 发电机节点的注入功率的期望值由经济调度确定, 标准差通过历史数据统计得到。

1.3 电力系统概率不安全指标

本文在原有电力系统概率不安全指标的基础上, 增加了故障清除时间这一随机因素, 将指标修改为:

$$I_{sec}(l) = \sum_{k=1}^4 a(k) \int_0^{x_0(l)} f_x(x) \int_0^{x_0(l)} f_r(r) \int_{\min}^{\max} f_\tau(\tau) M_{\Omega(l,k,x,r,\tau)}(y) \tau dr dx \quad (7)$$

其中: l 为线路编号; $I_{sec}(l)$ 为线路 l 的动态概率不安全性指标, 其物理意义是线路 l 发生故障时出现失稳的不安全概率。 k 表示故障类型, $k=1$ 为单相对地短路故障, $k=2$ 为两相间短路故障, $k=3$ 为两相对地短路故障, $k=4$ 为三相短路故障; $\alpha(k)$ 是类型为 k 的故障所占的比例; x 为故障地点距线路始端的距离; $x_0(l)$ 为线路 l 的长度; $f_x(x)$ 为 x 的概率分布密度函数; r 为故障电阻; $f_r(r)$ 为 r 的概率分布密度函数; τ 为故障切除时间; $f_\tau(\tau)$ 是 τ 的概率分布函数; $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]$ 为节点注入功率向量, n 为注入节点数; $\Omega(l, k, x, r, \tau)$ 为既定事故的动态安全域 (以下简称 Ω); $M_\Omega(y)$ 为既定事故的安全性测度。

2 暂态稳定风险评估

2.1 失稳后果评估

对失稳后果的评估本文主要计及了两个方: 事故后防止全系统失稳而采取的紧急控制措施成本和全系统失稳的损失, 用式 (8) 表示:

$$I_m = I_{ms} + I_{mo} + I_{mD} + I_{mc} \quad (8)$$

第一项为维修和启动成本 I_{ms} 。主要包括关机成本（强行关机对发电机造成一定的冲击，引起发电机寿命减损，可折算成经济指标），维修成本（机组和故障线路的维修成本）和启动成本。

第二项为发电机会成本 I_{mo} ，当机组停机后，原本由其承担的交易可能需要由其它机组（通常是一些低效、高燃料成本的机组）来替代完成，由此造成的损失称为发电机会成本，可由下式表示：

$$I_{mo} = (C_{new} - C_{old}) \cdot h \cdot P_{lost} \quad (9)$$

其中： C_{new} 是故障期间的单位发电成本； C_{old} 是故障前的单位发电成本； h 是故障持续时间； P_{lost} 是停运机组应供应的电力。

第三项为负荷损失成本 I_{mD} ，可定义为下式：

$$I_{mD} = C_{pen} \cdot h \cdot P_{shed} \quad (10)$$

其中： C_{pen} 为单位功率的负荷损失， h 为持续时间， P_{shed} 为断电负荷量。

第四项为可能引发的连锁事件导致系统大面积失稳的损失 I_{mc} ，这很难界定，但值会很大，一般可以通过统计系统出现大面积失稳后对该地区的主要用户（企业、工厂等）造成的损失之和得到该值。

2.2 暂态稳定风险评估模型

电力系统暂态稳定风险评估是指综合考虑电力系统的各种不确定因素，针对可能发生的故障的概率及其严重性效应，评价系统所处的风险水平。根据定义，某一故障的风险可以用下式表示：

$$R_{risk} = I_m \cdot p \quad (11)$$

其中：

$$p = p_0 \cdot \alpha(k) \cdot I_{sec}^{(k)} \quad (12)$$

$$I_{sec}^{(k)}(l) = \int_0^{x_0^{(l)}} f_x(x) \int_0^{\infty} f_r(r) \int_{\min}^{\max} f_\tau(\tau) M_{\Omega(l,k,x,r,\tau)}(y) d\tau dr dx \quad (13)$$

I_m 为系统失稳的损失，由式 (8) 计算得出； p 为系统发生某种类型故障且失稳的概率，由式 (12)、(13) 确定， $I_{sec}^{(k)}$ 为既定故障的概率不安全指标； p_0 为系统发生故障的概率。假设系统稳定时，严重性效应为 0，失稳时，严重性效应等于 I_m 。

计算系统暂态风险指标的完整算法流程图如图 1。

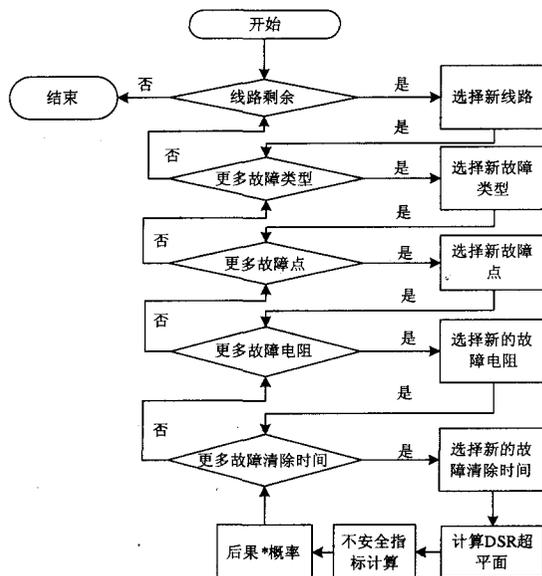


图 1 计算暂态风险指标的算法流程图

Fig.1 Flow chart for transient risk index calculation

计算步骤：

(1) 选定某特定线路和某种短路故障类型，根据历史运行数据确定与故障相关的不确定因素的概率模型如故障点、故障电阻和故障清除时间。

(2) 计算各种故障状况下的动态安全域超平面系数。

(3) 根据式 (13) 计算该短路故障类型的概率不安全指标 $I_{sec}^{(k)}$ 。

(4) 利用 2.1 对该故障的期望损失进行估计。

(5) 根据历史数据统计该线路上出现故障的概率 p_0 以及这种类型故障在的比例 $\alpha(k)$ ，根据式 (11) 计算出当前系统运行状况下，该故障类型所对应的暂态风险指标值。

(6) 分别选取另外三种类型的短路故障，按照 (1) ~ (5) 相同的做法得到对应的暂态风险指标值。

(7) 把以上四种类型的短路故障的风险指标值相累加，就可以得到该线路对应于全部故障的暂态风险指标值。

(8) 对所有线路进行评估，将所得指标值相加得到整个系统的暂态风险指标，同时通过比较可以得出系统的薄弱环节。

3 算例

下面以图 2 所示的 IEEE 的 4 机 11 节点系统为例，对上述模型进行验证。仅以线路 f 为例，计算该线路在单位时间内的暂态风险指标。

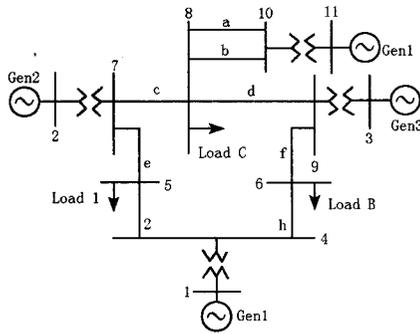


图2 IEEE 4机10节点系统

Fig.2 IEEE 4-generator 10-bus test system

系统参数如下所示：故障率 $\lambda = 180 \times 10^{-5}$ ；

$C_{old} = 120(\text{RMB/MWhr})$ ； $C_{new} = 180(\text{RMB/MWhr})$ ；

$I_m = 160000(\text{RMB})$ ； $C_{pen} = 200(\text{RMB/MWhr})$

表1 系统功率注入参数 (100 MW)

Tab.1 Injection information of the system

y_i 节点	Gen2	Gen3	Load A	Load B	Load C	Gen 4
μ_i	1.06	1.48	1.20	1.28	1.38	1.10
σ_i^2	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01

按照步骤(1~2)计算动态安全域超平面，表2列出 $r=2 \Omega, t=0.12 \text{ s}$ ，在节点6侧发生各种故障类型时对应的超平面系数，图2为超平面的二维空间断面图。从表2和图3可知三相短路故障的动态安全域最小，在同一运行点最易出现失稳。

表2 仅考虑故障类型不同时的动态域超平面系数对比

Tab.2 DSR boundary hyper-plane coefficients of different contingency

	Gen2	Gen3	Load A	Load B	Load C	Gen 4
三相短路	0.435 2	0.544 7	-0.138 0	-0.037 5	-0.398 2	0.489 3
两相接地	0.421 9	0.493 1	-0.131 2	-0.004 5	-0.410 5	0.449 1
相间短路	0.423 9	0.491 4	-0.131 8	-0.004 1	-0.410 4	0.448 6
单相接地	0.419 3	0.495 1	-0.131 6	-0.001 0	-0.411 7	0.441 1

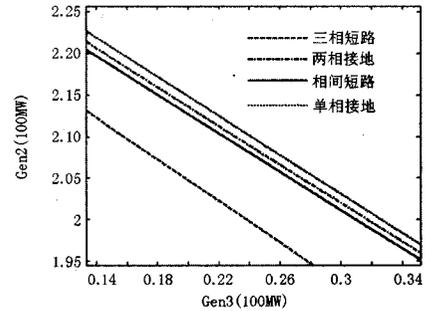


图3 二维空间动态安全域超平面断面图

Fig.3 Two-dimension section of the DSR

按照上述计算步骤(3~6)逐步求解，得到表3所示的暂态稳定分析结果。

表3 线路f在各种故障下的概率不安全指标和暂态风险指标

Tab.3 Probabilistic insecurity index and transient risk index of different contingencies at line f

	三相短路	两相接地短路	相间短路	单相接地短路
故障所占比例 $\alpha(k)$	0.52%	16.55%	27.46%	55.47%
概率不安全指标	78.11%	19.40%	20.90%	10.09%
暂态风险指标/RMB	649.87	5 137.12	9 182.62	8 955.08

线路f的不安全概率指标：

$$I_{sec}(f) = 0.52\% \times 78.11\% + 16.55\% \times 19.40\% + 27.46\% \times 20.90\% + 55.47\% \times 10.09\% = 14.95\%$$

线路f的暂态风险指标：

$$RISK(f) = 0.52\% \times 78.11\% \times 160000 + 16.55\% \times 19.40\% \times 160000 + 27.46\% \times 20.90\% \times 160000 + 55.47\% \times 10.09\% \times 160000 = 649.87 + 5737.12 + 9182.62 + 8955.08 = 23924.69$$

从表3可以看出线路发生三相短路故障时，其概率不安全指标很高，即很容易发生失稳，造成系统失稳损失，但由于三相短路故障发生的概率很低，因此其暂态风险指标不是很高。相间短路和单相接地短路故障由于发生的概率很高，所以暂态风险指标比较高。在对电力系统进行控制时，对于发生概率高、暂态风险指标高的故障可以优先考虑预防控制措施，对于三相短路这种发生概率很小，暂态风险指标不高的故障可以采用紧急控制措施以保证系统的稳定运行。

4 结论

本文建立了一种新的基于概率不安全指标的暂态风险评估模型。该模型以动态安全域为分析手段,通过概率不安全指标表征系统的不安全状况,结合风险理论,将系统的暂态风险量化为一个经济指标。该模型综合考虑了故障的发生、故障类型、故障发生地点、故障清除时间、故障电阻和系统运行状况等不确定信息,能真实反映系统的运行风险水平,同时兼顾了安全性和经济性,为系统运行人员运行决策提供了一个实用的参考信息。如何利用电力系统暂态风险评估的结果实现经济有效的暂态稳定综合控制是下一步将要研究的内容。

参考文献

- [1] 赵霞,周家启,胡小正.暂态稳定性分析中的确定性方法和概率性方法[J].电力系统自动化,2006,30(6):100-103.
ZHAO Xia, ZHAO Jia-qi, HU Xiao-zheng. Deterministic and Probabilistic Approaches in Transient Stability Studies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,30(6):100-103.
- [2] 甘德强,王锡凡,王小路.电力系统概率暂态稳定性的分析[J].中国电力,1994,27(4):32-35.
GAN De-qiang, WANG Xi-fan, WANG Xiao-lu. Probabilistic Transient Stability Analysis of Power System[J]. Electric Power, 1994,27(4):32-35.
- [3] 张健,刘怀东.输电线路概率安全性测度研究[J].电力系统及其自动化学报,2003,12:34-36.
ZHANG Jian, LIU Huai-dong. Study on Probabilistic Security Measures of Transmission Line[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2003, 12: 34-36.
- [4] 刘福斌.基于风险的电力系统安全评估决策和市场运作(博士学位论文)[D].南京:东南大学,2003.
LIU Fu-bin. Risk-based Assessment, Decision and Operation of Power System Security in Power Market, Doctoral Dissertation[D]. Nanjing: Southeast University, 2003.
- [5] 余贻鑫,陈礼义.电力系统的安全性与稳定性[M].北京:科学出版社,1988.
YU Yi-xin, CHEN Li-yi. Security and Stability of Electrical Power System[M]. Beijing: Science Press, 1988.
- [6] 冯飞.电力系统动态安全域的研究(博士学位论文)[D].天津:天津大学,2003.
FENG Fei. A Study on Dynamic Security Region of Power System, Doctoral Dissertation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2003.
- [7] 曾沅,樊纪超,余贻鑫,等.电力大系统实用动态安全域[J].电力系统自动化,2001,25(16):6-10.
ZENG Ruan, FAN Ji-chao, YU Yi-xin, et al. Practical Dynamic Security Regions of Bulk Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(16):6-10.
- [8] LI Wen-yuan. Risk Assessment of Power System: Models, Method, and Applications[M]. New York(NY,USA):John Wiley & Sons, 2005.

收稿日期:2008-07-09; 修回日期:2008-08-21

作者简介:

唐晓玲(1984-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统的安全与稳定,现从事继电保护工作。E-mail: tangxiaoling203@126.com

(上接第39页 continued from page 39)

- [5] 辛开远,杨玉华,陈富.计算配电网线损的GA与BP结合的新方法[J].中国电机工程学报,2002,22(2):79-82.
XIN Kai-yuan, YANG Yu-hua, CHEN Fu. An Advanced Algorithm Based on Combination of GA with BP to Energy Loss of Distribution System[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 79-82.
- [6] 文福拴,韩祯祥.联合采用Kohonen模型和BP模型的配电网线损计算[J].电工技术学报,1993,(3):16-20.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. The Calculation of Energy Losses in Distribution Systems Based upon Kohonen's Model and BP Model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1993, (3): 16-20.
- [7] 陈天恩,于鹏.用函数型神经网络计算配网的线损[J].

甘肃电力,1996,(1):40-41.

CHEN Tian-en, YU Peng. The Calculation of Energy Losses in Distribution Systems Based Upon a Functional Neural Network Model[J]. Gansu Power System, 1996, (1): 40-41.

收稿日期:2008-07-07; 修回日期:2008-10-04

作者简介:

李秀卿(1954-),男,教授,硕士生导师,研究领域为电力系统规划及电力系统经济调度;

汪海(1971-),男,主要从事电力系统运行与控制方面的研究;

赵丽娜(1980-),女,硕士研究生,研究方向为电力系统及其自动化。E-mail: zhaolina0606@126.com