

基于典型故障集的暂态功角稳定近似判别方法

刘静琨¹, 李勇², 张宁¹, 刘楠³, 陈国强³

(1. 电力系统国家重点实验室, 清华大学电机系, 北京 100084; 2. 国网北京经济技术研究院, 北京 102209;
3. 国家电网公司, 北京 100031)

摘要: 为适应特高压电网安全风险的新特征, 需要研究考虑系统暂态功角稳定的风险评估评价方法。现有电力系统暂态功角稳定性判断方法计算量很大, 无法满足特高压电网风险评估的计算要求。研究了影响系统故障后暂态功角稳定的因素, 基于EEAC法推导了这些因素对于系统临界稳定性的灵敏度, 进而设计了在已知典型故障临界稳定信息条件下近似判断边界条件变化后近似场景下暂态功角稳定性的方法。最后设计了考虑电力系统暂态功角稳定的风险评估流程, 为特高压电网风险评估提供了新的思路。

关键词: 特高压电网; EEAC法; 暂态功角稳定; 灵敏度; 风险评估

Approximately evaluating power system transient angle stability based on typical failure set

LIU Jing-kun¹, LI Yong², ZHANG Ning¹, LIU Nan³, CHEN Guo-qiang³

(1. State Key Lab of Power Systems, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, China; 3. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China)

Abstract: The safety feature of the ultra-high voltage power grid brings the needs of the risk assessment method that is able to consider the transient angle stability. The existing transient angle stability evaluation methods employ large amount of calculation and thus can not meet the requirements of the risk assessment of the ultra-high voltage power grid. This paper studies the factors that influence the transient angle stability after system fault, and analytically derives the sensitivity of these factors to system critical stability based on Extended Equal-Area Criterion (EEAC) method. The method of approximately evaluating transient angle stability based on typical failure set after the approximately judging boundary condition changes is then proposed. Finally, the framework of power system risk assessment method is carried out considering transient angle stability. It provides new ideas to the risk assessment method of ultra-high voltage power grid.

Key words: ultra-high voltage power grid; EEAC method; transient angle stability; sensitivity; risk assessment

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)14-0001-07

0 引言

建设以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网为电力规划带来新的挑战, 随着特高压电网输电容量的不断增加, 在大扰动下系统面临暂态功角失稳的风险^[1-2]。为适应大电网安全风险的新特征, 需要研究考虑系统暂态功角稳定的风险评估评价方法^[3]。

电力系统风险评估的目的是分析系统中发电、输电及用电不确定性可能造成的电力系统停电事故的严重程度及停电损失。电力系统风险评估按对系

统状态分析的性质可分为系统充裕性和系统安全性两个方面。充裕性主要考虑电源及电网的容量约束条件, 只涉及到系统的稳态条件; 而考虑安全性的风险评估则需要考虑系统对动态和暂态扰动的响应能力, 对系统中出现的扰动及其后果进行评价。在特高压电网的建设中, 系统安全性是需要考虑的重要因素, 因此在特高压跨区联网的风险评估中需要关注系统的安全稳定性, 即特高压线路故障后系统是否能够保持稳定。系统的暂态稳定性与系统故障前的运行状况以及干扰程度及方式有关, 在某种运行方式下暂态稳定的系统, 在另一种运行方式下或另一种扰动情况下可能是暂态不稳定的。因此, 对于系统某一个特定运行状态下某个特性的故障, 往往需要采用时序仿真的方法判定系统的稳定性。在

基金项目: 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题 (SGCC-MPLG017-2012)

风险评估中需要对大量系统可能的故障进行稳定性判定,但是对于每种采样情景都进行时序仿真,计算开销极大。现有的仿真技术与计算机计算能力无法满足风险评估中大量故障样本下的时序仿真需求。

为了解决电力系统暂态功角稳定性时序仿真计算时间较长、且仅能得到局部信息的局限性,学者们展开了大量的研究。从方法上提出了扩展等面积法(EEAC)、李雅普诺夫直接法、势能边界法(PEBS)等暂态能量函数法以及基于智能算法的暂态稳定性在线评估方法,这些方法能够在更短的时间内估计系统故障后的稳定性^[4-10]。为了解决暂态稳定评估只能得到特定系统运行情况下的暂态稳定性的局限,提出了系统暂态稳定的边界及其近似方法^[11-13]。与此同时,学者们也提出了一系列方法在暂态稳定性评估中计及系统的不确定性,使电力系统风险评估中能够一定程度上考虑系统的暂态安全性^[14-19]。

本文针对风险评估中考虑系统暂态功角稳定性的问题,提出了基于典型故障集的电力系统暂态功角稳定近似判别方法。该方法基于EEAC法,首先选取系统的典型运行方式下的各种典型故障进行稳定性判断,得到系统临界稳定的信息;之后计算影响系统稳定的各项因素对于系统临界稳定性的灵敏度;最后在风险评估的随机采样中利用典型故障信息近似判断其他与之相近的场景的稳定性。本文提出的方法能够用于风险评估等对于系统功角暂态稳定性计算速度要求很高的场合。

1 系统故障暂态稳定性的影响因素分析

能够影响系统暂态稳定的因素有很多。发电机电势、系统电抗、电压、功角、原动机出力、负荷大小、系统惯性大小、故障切除角、故障切除时间等因素都能对暂态稳定产生影响。本文将这些影响因素归纳为故障中不平衡功率、故障切除时间以及系统惯性大小三个方面。

故障中不平衡功率:指系统发生扰动后,以扰动点分界面,系统形成两个功率不平衡的部分,功率有缺额部分的机组将减速,功率有盈余部分的机组将加速。故障中不平衡功率的大小将直接决定加速机群以及减速机群的加速度,进而影响系统在故障切除后是否能够保持稳定。系统故障中的不平衡功率主要与故障线路故障前的传输功率以及故障类型有关。

故障切除时间:故障切除时间将决定切除时系统加速机群与减速机群功角差的大小以及故障切除

后系统是否能够回到稳定状态。因而对于故障而言存在极限切除时间的概念,故障切除时间大于极限切除时间,则切除故障后系统无法保持稳定。

系统惯性大小:系统发生扰动后,加速机群以及减速机群惯性的大小将影响加速机群与减速机群功角的加速度,对于同样大小的不平衡功率,功角加速度与惯性成反比。系统惯性大小与发电机参数以及发电机群的容量有关。

2 EEAC 法原理

EEAC法在系统失稳模式已知的情况下,将系统机群根据其受扰动情况进行双机等值,并最终转化为单机无穷大系统,采用等面积准则判别系统故障后的稳定性。图1为EEAC法进行单机无穷大等值系统的功角特性图,下面结合图1说明本文中用到的EEAC法中的变量符号,以下符号均为单机无穷大等值系统中的等值参数。

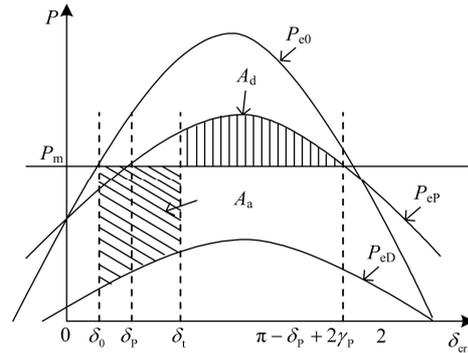


图1 EEAC法等值系统功角特性

Fig. 1 Power angle characteristic of equivalent system in EEAC

图中: M 为将两机群等效为单机无穷大系统后的等效单机的惯性时间常数; P_m 为等效单机原动机功率; δ_0 为等效单机故障前功角; δ_{cr} 为等效单机临界切除角; t_{cr} 为临界切除时间;故障前、故障中、故障后的功角特性分别为

$$\begin{aligned} \text{故障前: } P_{e0} &= P_{C0} + P_{\max 0} \sin(\delta - \gamma_0) \\ \text{故障中: } P_{eD} &= P_{CD} + P_{\max D} \sin(\delta - \gamma_D) \\ \text{故障后: } P_{eP} &= P_{CP} + P_{\max P} \sin(\delta - \gamma_P) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: P_{C0} 、 P_{CD} 、 P_{CP} 、 $P_{\max 0}$ 、 $P_{\max D}$ 、 $P_{\max P}$ 、 γ_0 、 γ_D 、 γ_P 分别为故障前、故障中以及故障后等效功角特性中的等值参数; δ_p 为故障后等效机组稳定平衡点对应功角

$$\delta_p = \sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}} + \gamma_P \quad (2)$$

3 基于典型故障集的电力系统暂态功角稳定近似判别方法

3.1 概述

在 EEAC 法的基础上, 引入系统故障中加速能量以及故障切除后减速能量的概念, 分别研究故障中不平衡功率、故障切除时间对于加速能量与减速能量的灵敏度, 近似计算在影响因素与典型故障集

不同的时候其加速能量与减速能量的变化, 与此同时分析系统惯性大小对于系统临界稳定条件的影响。进而通过对比采样系统加速能量与减速能量以及临界稳定条件, 近似判定采样系统故障后的稳定性。在图 1 的暂态稳定分析原理图中, 图中面积正比于系统的能量, 因此对于加速能量与减速能量的判断可以等效为对于系统加速面积与减速面积的判断。本文的研究思路如图 2 所示。

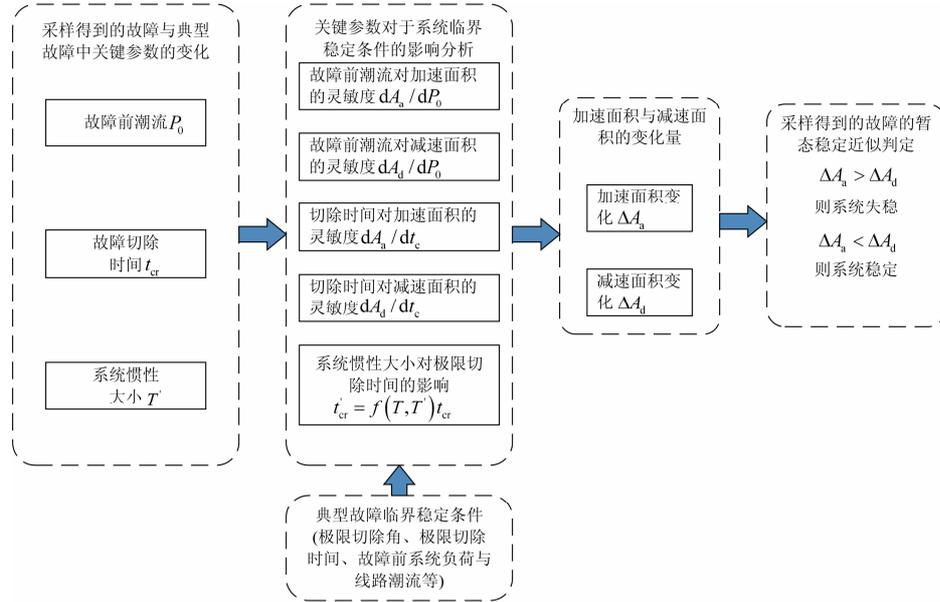


图 2 方法的研究框架

Fig. 2 Framework of the proposed method

3.2 加速面积与减速面积对不平衡功率的灵敏度

下面推导图 2 中的各个灵敏度的表达式。

线路故障中, 等效单机无穷大系统发电机瞬时不平衡功率为

$$\tilde{P} = P_m - P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_0 - \gamma_D) \quad (3)$$

故障前系统各发电机出力不同, 则系统等效原动机功率 P_m 不同, 故障中的不平衡功率也不相同, 进而导致系统故障中加速面积以及故障后最大减速面积也不相同。下面将推导加速面积与最大减速面积对 P_m 的灵敏度近似估计系统不平衡功率对于加速面积/减速面积的影响。

根据上节的推导, 多机系统映射为单机无穷大系统后, 临界稳定条件下 (即加速面积等于最大减速面积条件下), 等效加速面积的表达式为

$$A_a = \int_{\delta_0}^{\delta_c} [P_m - P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta - \gamma_D)] d\delta = (P_m - P_{CD})(\delta_{cr} - \delta_0) + P_{\max D} [\cos(\delta_{cr} - \gamma_D) - \cos(\delta_0 - \gamma_D)] \quad (4)$$

线路潮流变化后, 两机群惯性中心的功角差 δ_0 也同时发生变化, 因此需要将 δ_0 写为包含 P_m 的形式, 由故障前功角特性的计算公式可知:

$$P_m = P_{e0} = P_{C0} + P_{\max 0} \sin(\delta - \gamma_0) \quad (5)$$

并且

$$\delta_0 = \sin^{-1} \frac{P_m - P_{C0}}{P_{\max 0}} + \gamma_0 \quad (6)$$

因此可得

$$A_a = (P_m - P_{CD})(\delta_c - \sin^{-1} \frac{P_m - P_{C0}}{P_{\max 0}} + \gamma_0) + P_{\max D} \left[\cos(\delta_c - \gamma_D) - \cos(\sin^{-1} \frac{P_m - P_{C0}}{P_{\max 0}} + \gamma_0 - \gamma_D) \right] \quad (7)$$

因此系统加速面积对系统不平衡功率的灵敏度为

$$\frac{dA_a}{dP_m} = (\delta_c - \sin^{-1} \frac{P_m - P_{C0}}{P_{\max 0}} + \gamma_0) - \frac{P_m - P_{CD}}{P_{\max 0} \sqrt{1 - [(P_m - P_{C0})/P_{\max 0}]^2}} + \frac{P_{\max D} \sin(\sin^{-1} [(P_m - P_{C0})/P_{\max 0}] + \gamma_0 - \gamma_D)}{P_{\max 0} \sqrt{1 - [(P_m - P_{C0})/P_{\max 0}]^2}} \quad (8)$$

与加速面积近似, 系统最大减速面积 A_d 可以表示为

$$A_d = (P_{CP} - P_m)(\pi - \delta_c - \delta_p + 2\gamma_p) + P_{\max P} [\cos(\delta_c - \gamma_p) - \cos(\delta_p - \gamma_p)] \quad (9)$$

式(9)中 δ_p 的表达式为

$$\delta_p = \sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}} + \gamma_p \quad (10)$$

因此可得 A_d 的表达式为

$$A_d = (P_{CP} - P_m)(\pi - \delta_c - \sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}} + \gamma_p) + P_{\max P} \left[\cos(\delta_c - \gamma_p) + \cos(\sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}}) \right] \quad (11)$$

对式(11)求 P_m 的导数, 可得

$$\frac{dA_d}{dP_m} = (\delta_c + \sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}} - \gamma_p - \pi) + \frac{(P_m - P_{CP})}{P_{\max P} \sqrt{1 - [(P_m - P_{CP})/P_{\max P}]^2}} - \frac{(P_m - P_{CP})}{P_{\max P} \sqrt{1 - [(P_m - P_{CP})/P_{\max P}]^2}} = \quad (12)$$

$$\delta_c + \sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}} - \gamma_p - \pi$$

3.3 加速面积与减速面积对切除时间的灵敏度

由于加速/减速面积中不包含系统切除时间, 仅包含系统切除角, 因此需要首先推导加速与最大减速面积对于切除角的灵敏度, 再推导切除角对于切除时间的灵敏度。

根据上文中推导的加速面积与最大减速面积的表达式, 加速面积与最大减速面积对切除角的灵敏度如式(13)。

$$\begin{aligned} \frac{dA_a}{d\delta_c} &= P_m - P_{CD} + P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D) \\ \frac{dA_d}{d\delta_c} &= P_{CP} - P_m + P_{\max P} \sin(\delta_c - \gamma_p) \end{aligned} \quad (13)$$

下面推导极限切除角对于切除时间的灵敏度, 对于单机无穷大系统而言, 发生短路故障, 故障期间内发电机转子将加速, 加速过程中的转子运动方程如式(14)。

$$\begin{cases} \frac{d\delta}{dt} = \omega \\ M \frac{d\omega}{dt} = \tilde{P} \end{cases} \quad (14)$$

故障切除时刻附近, 系统的不平衡功率为

$$\tilde{P} = P_m - P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D) \quad (15)$$

转子的角加速度可表示为

$$a = \frac{\tilde{P}}{M} \quad (16)$$

因此故障发生瞬间以及故障切除时, 转子角加速度可表示为

$$a_1 = \frac{\tilde{P}_1}{M}, a_2 = \frac{\tilde{P}_2}{M} \quad (17)$$

假设 a 随时间的变化是近似线性的, 从故障发生时刻开始, t 时刻转子角加速度为

$$a = \frac{a_2 - a_1}{t_{cr}} t + a_1 \quad (18)$$

从故障开始, 至故障临界切除时的 t 时刻转子角速度增量可由式(19)计算。

$$\Delta\omega = \int_0^t a dt = \int_0^t \left[\frac{a_2 - a_1}{t_{cr}} t + a_1 \right] dt \quad (19)$$

因此, 在临界切除时, 转子角速度增量可表示为

$$\begin{aligned} \omega(t_c) &= \frac{1}{2}(a_1 + a_2)t_c = \\ &= \frac{1}{2M} \left[\frac{2P_m - 2P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D)}{-P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_p)} \right] t_c \end{aligned} \quad (20)$$

由转子运动方程可知

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega \quad (21)$$

因此可以可知, 切除时间附近, 切除角与切除时间的灵敏度即此时的转子角速度为

$$\frac{d\delta_c}{dt} = \frac{1}{2M} \left[\frac{2P_m - 2P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D)}{-P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_p)} \right] t_c \quad (22)$$

综合上述推导, 可知加速面积与减速面积对切除时间的灵敏度可分别表示为

$$\begin{aligned} \frac{dA_a}{dt_c} &= \frac{dA_a}{d\delta_c} \frac{d\delta_c}{dt_c} = \frac{1}{2M} \left[\frac{P_m - P_{CD} + P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D)}{P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D)} \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{2P_m - 2P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D)}{\gamma_D} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_P) \right] t_c \\ \frac{dA_d}{dt_c} &= \frac{dA_d}{d\delta_c} \frac{d\delta_c}{dt_c} = \frac{1}{2M} \left[\frac{P_{CP} - P_m + P_{\max P} \sin(\delta_c - \gamma_P)}{P_{\max P} \sin(\delta_c - \gamma_P)} \right] \cdot \\ &\quad \left[\frac{2P_m - 2P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_D)}{\gamma_D} - P_{\max D} \sin(\delta_c - \gamma_P) \right] t_c \end{aligned} \quad (23)$$

3.4 系统等效惯量大小对临界切除时间的影响

设 M 为多机系统等效为单机无穷大系统时的等效惯量, 其大小将决定故障后系统等效功角加速的快慢, 进而决定系统临界切除时间。系统等效转子角的位移与时间的关系为

$$\begin{aligned} dA_a &= \left\{ \frac{1}{2M'} [P_m - P_{CD} + P_{\max D} \sin(\delta_{cr} - \gamma_D)] \cdot [2P_m - 2P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_{cr} - \gamma_D) - P_{\max D} \sin(\delta_{cr} - \gamma_P)] t'_{cr} \right\} dt_c + \\ &\quad \left\{ (\delta_{cr} - \sin^{-1} \frac{P_m - P_{C0}}{P_{\max 0}} + \gamma_0) - \frac{P_m - P_{CD}}{P_{\max 0} \sqrt{1 - [(P_m - P_{C0})/P_{\max 0}]^2}} + \frac{P_{\max D} \sin(\sin^{-1} [(P_m - P_{C0})/P_{\max 0}] + \gamma_0 - \gamma_D)}{P_{\max 0} \sqrt{1 - [(P_m - P_{C0})/P_{\max 0}]^2}} \right\} dP_m \quad (27) \\ dA_d &= \left\{ \frac{1}{2M'} [P_{CP} - P_m + P_{\max P} \sin(\delta_{cr} - \gamma_P)] \cdot [2P_m - 2P_{CD} - P_{\max D} \sin(\delta_{cr} - \gamma_D) - P_{\max D} \sin(\delta_{cr} - \gamma_P)] t'_{cr} \right\} dt_c + \\ &\quad \left[\delta_{cr} + \sin^{-1} \frac{P_m - P_{CP}}{P_{\max P}} - \gamma_P - \pi \right] dP_m \end{aligned}$$

上式可记为

$$\begin{aligned} dA_a &= \lambda_{tc}^a dt_c + \lambda_{P_m}^a dP_m \\ dA_d &= \lambda_{tc}^d dt_c + \lambda_{P_m}^d dP_m \end{aligned} \quad (28)$$

4 考虑电力系统暂态功角稳定的风险评估流程

上述方法提供了已知系统各线路典型运行方式的情况下快速判断系统其他运行状况下相同故障的暂态功角稳定性的方法。在风险评估中, 可以事先用过时序仿真后分析系统各种典型故障的临界稳定条件, 之后在随机采样中, 根据采到的故障状态以及系统运行状态, 与典型故障的临界稳定条件进行对比, 进而近似判定采样的故障是否破坏系统的暂态稳定性。基于上述推导设计考虑电力系统暂态功角稳定的风险评估流程如下。

可以由此得到基于典型故障集的系统暂态稳定性判别方法:

$$\Delta\delta = \frac{1}{2} at^2 = \frac{1}{2} \frac{\tilde{P}}{M} t^2 \quad (24)$$

在加速过程中, \tilde{P} 随时间而不断发生变化, 因此转子角的加速运动为变加速运动, 当系统等效惯量发生变化时, 转子角加速各时刻的加速度也等比例的变化。若已知系统某一运行状态下故障对应的等效惯量为 M , 系统临界切除时间 t_{cr} 。同一故障下, 若系统等效惯量为 M' , 则对应的临界切除时间与原故障状态临界切除时间之间的关系为

$$\frac{1}{2} \frac{\tilde{P}}{M} t_{cr}^2 = \frac{1}{2} \frac{\tilde{P}}{M'} t'_{cr}{}^2 \quad (25)$$

因此有

$$t'_{cr} = t_{cr} \sqrt{M'/M} \quad (26)$$

3.5 系统故障暂态稳定性的近似判别方法

由上述推导可得系统的加速面积以及减速面积的全微分形式如式 (27)。

1) 扫描系统典型故障集, 利用 EEAC 法得到系统典型运行方式参数以及系统故障临界稳定条件的相关数据 ($M, P_m, P_{C0}, P_{CD}, P_{CP}, P_{\max 0}, P_{\max D}, P_{\max P}, \gamma_0, \gamma_D, \gamma_P, \delta_0, \delta_{cr}$)。

2) 对系统状态进行采样。

3) 判断系统采样是否对应故障状态, 如果是, 则进入步骤 4), 如果不是, 则返回步骤 2) 重新进行采样。

4) 采样得到系统故障状态, 并与系统典型故障集中故障进行匹配, 根据典型故障的稳定判定结果, 识别系统加速机群与减速机群。

5) 系统采样得到的故障状态对应的系统等效转动惯量 M' 按式(26)计算其等效极限切除时间 t'_{cr} 。

6) 根据系统采样状态以及系统典型故障集中系统参数, 分别计算线路故障前等效机械功率的差别 ΔP_m , 以及实际切除时间 t_c 与其极限切除时间 t'_{cr} 之间的差别 Δt_c 。

7) 按下两式分别计算加速面积与减速面积的变

化。

$$\begin{aligned}\Delta A_a &= \lambda_{ic}^a \Delta t_c + \lambda_{pm}^a \Delta P_m \\ \Delta A_d &= \lambda_{ic}^d \Delta t_c + \lambda_{pm}^d \Delta P_m\end{aligned}\quad (29)$$

8) 判断加速面积与减速面积相对的变化若有 $\Delta A_a - \Delta A_d > 0$ ，则可以认为系统故障后将产生暂态失稳，计算失稳后系统切负荷量，跳至步骤 10)。反之若 $\Delta A_a - \Delta A_d \leq 0$ 则可认为系统故障后是暂态稳定的，执行步骤 9)。

9) 采用最优潮流模型计算系统最优切负荷量。

10) 统计系统风险指标，并判断风险评估是否收敛，若计算收敛，则风险评估结束，若计算不收敛，则返回步骤 2) 重新进行采样。

5 算例分析

本文采用 IEEE-RTS 79 可靠性测试系统^[20]进行算例分析。

IEEE RTS-79 电力系统共包括 24 条母线 B_i ，其中 $i=1,2,\dots,24$ ；32 台发电机组 G_i ，其中 $i=1,2,\dots,32$ ；38 条支路 L_i ，其中 $i=1,2,\dots,38$ ；最高负荷 2 850 MW，装机容量为 3 405 MW。

区域 R_i 表示发电机组所在的节点属于某个区域，其中 $i=1,2,\dots,32$ ；区域 R1 包含节点 B1、B3、B4、B5；区域 R2 包含节点 B2、B6、B7、B8；区域 R3 包含节点 B9、B10、B11、B12；区域 R4 包含节点 B13；区域 R5 包含节点 B19、B20、B23；区域 R6 包含节点 B14、B15、B16、B24；区域 R7 包含节点 B17、B18、B21、B22。

扫描电力系统典型故障集，设此典型故障集中得到两个典型故障 1、2。其中，典型故障 1 所包含的线路为 L19，故障类型为三相短路，故障前线路潮流为-150 MW，加速区域包括 R1、R2、R3、R4，减速区域包括 R5、R6、R7，故障临界稳定条件的相关数据： $\delta_{cr}=1.2$ rad 和 $t_{cr}=0.5$ s。典型故障 2 所包含的线路为 L21、L22，故障类型均为三相短路，故障前线路潮流分别为-150 MW、-150 MW，加速区域包括 R1、R2、R3、R4，减速区域包括 R5、R6、R7，故障临界稳定条件的相关数据： $\delta_{cr}=1.2$ rad 和 $t_{cr}=0.5$ s。

设采样得到电力系统故障状态的故障线路为 L21 与 L22，故障类型为三相短路，将故障线路 L21、L22 与电力系统典型故障集中的典型故障集 1、2 分别进行故障匹配，成功匹配了典型故障 2，进而继续判断电力系统故障后是否暂态稳定。记录采样得到的电力系统故障线路 L21、L22 故障前功率均为

$P'_F=0$ MW，采样得到的电力系统故障线路实际切除时间均为 $t_c=0.5$ s。

经计算得到加速面积的变化 $\Delta A_a=40.730 2$ ，减速面积的变化 $\Delta A_d=213.589 9$ 。由于 $\Delta A_a - \Delta A_d < 0$ ，故判断该采样得到的电力系统故障后是暂态不稳定的。

6 结论

本文针对风险评估中考虑系统暂态功角稳定性的问题，提出了基于典型故障集的电力系统暂态功角稳定近似判别方法。分析了故障中不平衡功率、故障切除时间以及系统惯性大小对于系统暂态功角稳定性的影响，基于 EEAC 法推导了上述各项因素对于系统临界稳定性的灵敏度。设计了考虑电力系统暂态功角稳定的风险评估流程，该流程中首先选取系统的典型运行方式下的各种典型故障进行稳定性判断，得到系统临界稳定的信息，在对每一次系统故障进行暂态功角稳定性判定时，根据系统采样得到的运行状态以及本文推导的灵敏度关系，利用典型故障信息近似判断采样场景的稳定性，由于本文提出的方法计算量很小，因此适用于风险评估等对于系统功角暂态稳定性计算速度要求很高的场合。在本文研究思路的基础上，还可继续深入研究故障中采用切机、切负荷、直流功率调制等安控措施对系统等效加速面积与减速面积的影响，进而评估安控措施对于系统暂态稳定性提高的作用。

参考文献

- [1] 孙羽, 王秀丽, 王建学, 等. 电力系统短期可靠性评估综述[J]. 电力系统保护与控制. 2011(08): 143-154.
SUN Yu, WANG Xiu-li, WANG Jian-xue, et al. An overview of the short-term reliability evaluation of power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 143-154.
- [2] 何剑, 程林, 孙元章, 等. 计及天气预测的电力系统运行可靠性短期评估[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(10): 31-38.
HE Jian, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. Power system short-term operational reliability evaluation considering weather forecast[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(10): 31-38.
- [3] 张宁, 刘静琨. 影响特高压电网运行的因素及应对策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 109-114.
ZHANG Ning, LIU Jing-kun. The ultra high voltage grid risk analysis and its assessment framework[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 109-114.

- [4] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分
析[M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [5] 薛禹胜. EEAC和FASTEST[J]. 电力系统自动化, 1998,
22(9): 25-30.
XUE Yu-sheng. EEAC And FASTEST[J]. Automation of
Electric Power Systems, 1998, 22(9): 25-30.
- [6] 兰洲, 倪以信, 甘德强. 现代电力系统暂态稳定控制
研究综述[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 40-49.
LAN Zhou, NI Yi-xin, GAN De-qiang. A survey on
transient stability control of modern power systems[J].
Power System Technology, 2012, 30(13): 8-13.
- [7] 黄宇保. 快速暂态稳定计算方法研究[D]. 杭州: 浙江
大学, 2010.
- [8] 黄玉龙, 刘明波. 求解暂态稳定约束最优潮流的混合
算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 229-237.
HUANG Yu-long, LIU Ming-bo. Hybrid algorithm for
solution of transient stability constrained optimal power
flow[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,
2012, 27(5): 229-237.
- [9] 叶圣永, 王晓茹, 周曙, 等. 基于马尔可夫链蒙特卡罗
方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电工技术学报,
2012, 27(6): 168-174.
YE Sheng-yong, WANG Xiao-ru, ZHOU Shu, et al.
Power system probabilistic transient stability assessment
based on Markov chain monte carlo method[J].
Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,
27(6): 168-174.
- [10] 夏小琴, 韦化, 阳育德. 暂态稳定约束最优潮流的改
进降阶内点算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 87-92.
XIA Xiao-qin, WEI Hua, YANG Yu-de. An improved
reduced-dimension interior point method for transient
stability constrained optimal power flow[J]. Transactions
of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 87-92.
- [11] 侯凯元, 闵勇, 张瑞琪. 电力系统暂态稳定域边界局
部近似方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(1):
1-5.
HOU Kai-yuan, MIN Yong, ZHANG Rui-qi. Local
approximation of transient stability boundary of the
power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1):
1-5.
- [12] 刘辉, 闵勇, 张毅威. 电力系统暂态稳定域近似边界
可信域及其扩展[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1):
9-14.
LIU Hui, MIN Yong, ZHANG Yi-wei, et al. Credible
region and its extension for approximate boundaries of
transient stability region in power system[J]. Proceedings
of the CSEE, 2008, 28(1): 9-14.
- [13] 余贻鑫, 樊纪超, 冯飞. 暂态功角稳定不稳定平衡点
类型和临界割集数量的对应关系[J]. 中国电机工程学
报, 2006, 26(8): 1-6.
YU Yi-xin, FAN Ji-chao, FENG Fei. Relationship
between the number of critical cut-sets and the type of
unstable equilibrium point with respect to transient angle
stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(8): 1-6.
- [14] 孙元章, 周家启. 大型互联电网在线运行可靠性的基
础理论[M]. 北京: 清华大学出版社, 2010.
- [15] LI Wen-yuan. Risk assessment of power systems: models,
methods, and applications[M]. U.S.: IEEE and
Wiley-Inter Science, 2004.
- [16] 宋晓喆, 汪震, 甘德强, 等. 台风天气条件下的电网暂
态稳定风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2012,
40(24): 1-8.
SONG Xiao-zhe, WANG Zhen, GAN De-qiang, et al.
Transient stability risk assessment of power grid under
typhoon weather[J]. Power System Protection and
Control, 2012, 40(24): 1-8.
- [17] 王守相, 张伯明, 郭琦. 基于时间裕度的全局电力系
统暂态安全风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2005,
25(15): 51-55.
WANG Shou-xiang, ZHANG Bo-ming, GUO Qi.
Transient security risk assessment of global power
system based on time margin[J]. Proceedings of the
CSEE, 2005, 25(15): 51-55.
- [18] 刘道伟, 马世英, 李柏青, 等. 基于响应的电网暂态稳
定态势在线量化评估方法[J]. 中国电机工程学报,
2013, 33(4): 85-94.
LIU Dao-wei, MA Shi-ying, LI Bai-qing, et al.
Quantitative method for on-line power system transient
stability assessment based on response information[J].
Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 85-94.
- [19] 薛禹胜, 刘强, DONG Zhao-yang, 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 Yu-sheng, LIU Qiang, DONG Zhao-yang, et al. A
review of non-deterministic analysis for power system
transient stability[J]. Automation of Electric Power
Systems, 2007, 31(14): 1-6.
- [20] SUBCOMMITTEE P.M. IEEE Reliability test system[J].
IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979,
98(6): 2047-2054.
-
- 收稿日期: 2013-11-30
作者简介:
刘静琨(1989-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电
力系统风险评估; E-mail: liu_j_kk@163.com
李勇(1968-), 男, 高级工程师, 从事电网规划和工
程可研相关工作;
张宁(1985-), 男, 博士后, IEEE、IET 会员, 研究
方向为新能源发电、电力规划、电力调度。