

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.04.026

考虑故障切除时间的暂态扭矩放大风险评估方法

程欣

(国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司,江苏 无锡 214000)

摘要:由于电力系统具有许多不确定因素,利用确定性方法无法准确对发电机轴系遭受暂态扭矩放大风险进行评估,文中提出了一种暂态扭矩放大的风险评估方法。该方法考虑了故障切除时间对暂态扭矩的影响,并引入概率配点法求解暂态扭矩的概率密度函数。同时定义了发生暂态扭矩放大的严重程度函数。在此基础上,文中定义了发电机轴系受损的研究区域,缩小了风险评估的范围,从而更加全面准确地得出发电机轴系遭受暂态扭矩放大的风险评估结果。最后,通过 IEEE 16 机 68 节点系统的算例说明了该评估策略的有效性和实用性。

关键词:暂态扭矩放大;概率配点法;风险评估

中图分类号:TM71

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)04-0171-06

0 引言

我国伊敏、上都、神木、府谷等众多大型火电基地与负荷中心呈逆向分布,需要通过远距离串补线路将大规模煤电输送到负荷中心^[1-5]。但是,具有串联补偿输电线路的电力系统受到扰动后,汽轮发电机定子中会出现系统自然谐振频率的电流,当自然谐振频率的“互补频率(相对同步频率而言)”与机组轴系某一自然扭振频率分量接近时,会导致暂态扭矩放大现象。

文献[6-8]提出了一种分析次同步谐振危险的评估方法,即引入风险矩阵的概念。该风险评估方法同时考虑了次同步谐振的严重程度和各网络的构成差异以及不同故障发生的概率,从而获得发电机遭受次同步谐振风险的程度。而文献[9]进一步提出了一种线性的基于风险的评估方法,可以在短时间内对大系统进行评估,克服了如电压相角、幅值和负荷等非线性不确定因素问题。

但是,机组遭受的电气扰动仍具有多种不确定性,如发生故障的线路、故障类型、故障位置及清除时间等都具有随机性,然而,确定性暂态扭矩放大安全评估方法只考虑了故障后果的严重程度,并没有考虑事件发生的可能性,获得的评估结果可能过于保守或者过于乐观,不能全面地反映系统运行的安全态势。文献[10]定性地分析了多种不确定因素对暂态扭矩的影响;文献[11]提出了重合闸时间与轴系扭矩幅值的关系,考虑了重合闸时间对机组轴系冲击的影响;文献[12]提出一种考虑风速不确定性因素的风电场次同步谐振的评估方法,为不确定风险评估提供了一条新的思路。

文中首先分析了影响暂态力矩放大的不确定因素,如故障切除时间的不确定等,进一步提出了暂态扭矩放大安全风险指标,并选择概率配点法(probabilistic collocation method, PCM)拟合获得暂态扭矩峰值关于故障切除时间的联合概率密度函数,从而定量计算发电机遭受暂态扭矩放大的风险指数,最后通过算例分析验证了文中提出的评估方法的有效性。

1 影响暂态扭矩放大的故障随机因素

当故障发生时,发电机的电磁功率有一个下降阶跃,而当故障清除时,发电机的电磁功率有一个阶跃上升。较大的电磁功率阶跃会导致发电机轴系承受较大的暂态扭矩作用,造成发电机组轴系断裂。因此,故障类型、发生故障位置、故障切出时间及线路故障概率等故障随机性因素都会影响暂态扭矩放大的安全风险。

1.1 线路故障不确定性

一般认为电力系统元件发生事故的服从泊松分布,并且由于通常只研究在某一给定时间段内发生单一故障的情况,因此可以利用一阶泊松分布公式来计算故障发生的概率^[13],可表示为:

$$P_{\text{line}}(X_i) = \lambda_i e^{-\lambda_i} \quad (1)$$

式中: λ_i 是第*i*条线路的平均故障率,可从历史数据获得。

1.2 故障位置的不确定性

长线路不同位置距离发电机的等值阻抗相差较大,故障后暂态扭矩放大的严重程度不同,因此长线路的故障位置不确定性是影响暂态扭矩放大的安全风险的一个重要因素。当具有历史数据时,可以将故障位置的分布离散化来模拟。考虑

一条线路被分成 M 部分^[14], 并且假设线路各部分发生故障的可能性与其长度成正比, 则第 j 段发生故障的概率为:

$$P_{\text{line},ij}(Y_{i,j}) = f_{\text{line},ij} / \sum_{m=1}^M f_{\text{line},im} \quad (2)$$

式中: $f_{\text{line},ij}$ 是第 i 条线路的第 j 段发生故障频率的历史统计数据。

1.3 故障类型不确定性

不同的故障类型对系统暂态扭矩放大的影响程度不同。一般情况下, 多相故障导致电功率的阶跃变化较大, 会导致较严重暂态扭矩放大现象。但是, 对某些非对称故障而言, 系统状态的负序电流会产生更加不利^[12,15]。

常见的故障有以下 4 种: 单相短路接地、两相短路接地、两相短路和三相短路。分别用 1、2、3、4 来表示。不同类型的故障发生的概率与地理、天气等诸多因素有关, 可用历史统计数据计算第 k 类故障的概率 $P_{t,k}$ 。

$$P_{t,k}(Z_{t,k}) = f_{t,k} / \sum_{n=1}^N f_{t,n} \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中: $f_{t,n}$ 代表发生第 k 类故障的数目, 其中 $N=4$ 。

1.4 切除时间不确定性

故障切除是继电网故障后对机组的又一次冲击, 其对汽轮发电机组轴系扭振的影响是由故障切除时刻所激发的轴系扭振与故障时刻所激发轴系扭振的模式叠加造成的^[16]。当扰动清除时间为该轴系固有振荡频率半周期的偶数倍时, 暂态扭矩达到其极小值; 当扰动清除时间为该固有振荡频率半周期的奇数倍时, 暂态扭矩达到其极大值^[17]。

为简单起见, 故障清除时间通常用一个正态分布来模拟, 正态分布的 2 个参数(均值和方差)可由历史数据获得^[13]。则第 i 个线路的第 j 段发生故障时的清除时间的概率密度可表示为:

$$f_{td}(t_{cl,ijk}) = (1/\sqrt{2\pi}\sigma_{cl,ijk}) e^{-\frac{(t_{cl,ijk}-\mu_{cl,ijk})^2}{2\sigma_{cl,ijk}^2}} \quad (4)$$

式中: $t_{cl,ijk}$ 为第 i 个线路的第 j 段发生故障类型 k 时的清除时间随机变量; $\mu_{cl,ijk}$, $\sigma_{cl,ijk}$ 分别为故障清除时间的均值和方差, 可以通过历史统计数据计算。

2 暂态扭矩放大安全风险指标定义

2.1 暂态扭矩放大严重程度函数

故障后果的严重程度是故障暂态扭矩对汽轮发电机组轴系的威胁、影响以及后果的量化评估。

发电机机端在 105% 额定电压下, 遭受三相接地短路故障后的轴系最大暂态扭矩表示如下:

$$T_{\text{peak},l} = \max |T_{m,l}| \quad (5)$$

式中: $T_{m,l}$ 为第 l 个联轴器在故障发生 1 s 内所承受的暂态扭矩的仿真序列值, 其中 $l = 1, 2, \dots, L$, L 为联轴器的个数。

由于暂态力矩冲击时间不长, 并且很快会衰减, 考虑最大的冲击转矩, 超过峰值就认为对轴系有损坏作用。当暂态力矩值大于此峰值时, 严重程度函数值取值为 1, 小于此峰值的时候取 0。根据文献^[12], 暂态扭矩放大的严重程度可表示为:

$$f_{\text{Sev}}(T_{M,ijk}) = \begin{cases} 1 & T_{M,ijk} \geq 0.7T_{\text{peak},l} \\ 0 & T_{M,ijk} < 0.7T_{\text{peak},l} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $T_{M,ijk}$ 为第 i 个线路的第 j 段发生故障类型 k 时, 第 l 个联轴器 1 s 内所承受的暂态扭矩的峰值。

2.2 暂态扭矩放大安全风险指标

暂态扭矩放大安全风险指数是系统遭遇故障时, 同时考虑事件发生的可能性大小与产生的严重性后果而获得的一个综合性的预测指标。风险指标可以通过对每一个可能的事故风险进行叠加而获得。设系统中有 I 条线路, 每条线路上有 J 个故障点, 每个故障点可发生的故障类型有 K 种。全系统暂态扭矩放大概率可以表示为:

$$R = \max_l \left[\sum_i \sum_j \sum_k P_{\text{line}}(X_i) P_{\text{line},ij}(Y_{i,j}) P_{t,k}(Z_{t,k}) \times \left(\int f_{\text{Sev}}(T_{M,ijk}) \times f_{\text{torq}}(T_{M,ijk} | t_{cl,ijk}) dT_{M,ijk} \right) \right] \quad (7)$$

式中: $P_{\text{line}}(X_i)$, $P_{\text{line},ij}(Y_{i,j})$, $P_{t,k}(Z_{t,k})$ 可以分别由式(1)一式(3)求解; $f_{\text{Sev}}(T_{M,ijk})$ 是定量描述故障后暂态扭矩 $T_{M,ijk}$ 对轴系损毁的严重程度的函数; $f_{\text{torq}}(T_{M,ijk} | t_{cl,ijk})$ 是第 i 条线路第 j 段发生故障类型 k 的故障清除时间为 $t_{cl,ijk}$ 的暂态扭矩概率密度。

3 暂态扭矩概率密度求解的 PCM 法

求解式(7)定义的暂态扭矩放大的风险量化指标, 必须要求解随机切除时间概率分布确定条件下, 系统暂态扭矩的概率分布 $f_{\text{torq}}(T_{M,ijk} | t_{cl,ijk})$ 。文中选用 PCM 评估暂态扭矩的概率分布。

3.1 PCM

PCM 本质上是建立一个高阶多项式模型, 应用这个多项式近似系统某一输出随着不确定性输入参数变化的函数关系^[18-20]。该方法的优点是, 通过选择合适的仿真点建立一个与更高阶模型具有相同矩量的多项式。可应用正交多项式和高斯正交积分理论验证这种选择合适仿真点的合理性。

3.2 考虑切除时间的暂态扭矩概率分布计算

通过上述风险指数的定义, 可以利用 PCM 将发

生暂态扭矩放大时的风险进行量化,设系统不确定输入参数为切除时间 $t_{cl,ijk}$,系统随机输出为参数 $t_{cl,ijk}$ 下发电机的暂态扭矩峰值 $T_{M,lijk}$ 。其步骤如下:

(1) 选取发电机某一个联轴器 l 、特定的线路 i 、第 j 段故障位置和某种短路故障类型 k ,根据历史统计数据选择故障切除时间的概率密度函数为 $f_{id}(t_{cl,ijk})$ 。

(2) 根据式(4)产生关于故障切除时间概率密度函数 $f_{id}(t_{cl,ijk})$ 的正交多项式组 $H_a, a=0, \dots, n$ 。

(3) 计算正交多项式 H_a 的 n 个根作为 n 个切除时间配点。

(4) 通过时域仿真,得出每个故障清除时间配点为 $t_{cl,ijk(a)}$ 处的发电机轴系的暂态扭矩峰值,即 $T(t_{cl,ijk(a)})$ 。

(5) 利用 PCM 计算得到发电机轴系的暂态扭矩峰值与系统输入的不确定参数切除时间 $t_{cl,ijk}$ 之间的关系表达式 $T(t_{cl,ijk})$,即系统的随机输出随不确定性参数近似变化函数。

(6) 采用采样技术取随机切除时间 5 000 个点代入 $T(t_{cl,ijk})$ 得到对应的暂态扭矩峰值,并且在 Matlab 中绘制此时暂态扭矩峰值的概率密度曲线。将此曲线进行拟合得到暂态扭矩峰值关于切除时间的概率密度函数 $f_{torq}(T_{M,lijk} | t_{cl,ijk})$ 。

(7) 循环(2)~(6)计算发电机所有段联轴器的暂态扭矩概率分布。

4 算例分析

根据式(7),暂态扭矩放大的风险是在某种情

况下暂态扭矩出现的概率和在该情况下对轴系的严重程度之乘积。

4.1 研究区域的确定

根据文献[11]确定性的评估方法,在实际系统中由于母线较多,系统较大,作风险评估时应先大致确定研究区域,超过这个区域的故障由于引起所有的轴系暂态扭矩都特别小,根据严重程度函数的定义可知,其值为 0,对轴系损伤的影响,可忽略不计。文中以 IEEE 16 机,68 母线的测试系统为例对机组 G_1 轴系进行研究,如图 1 所示。在 G_1 周围的母线逐一施加三相短路故障,观察此时所有轴系的峰值暂态扭矩,并和定义的边界 $T_{peak,l}$ 进行比较, $T_{peak,l}$ 为 G_1 终端施加的三相短路故障的扭矩峰值。如果其中的至少一个峰值暂态扭矩不小于 $T_{peak,l}$,那么必须将其列为风险评估区域。为了保守起见,可以定义 $T_{peak,l}$ 的 70% 为边界暂态扭矩^[11],与之比较。满足条件的线路及暂态扭矩峰值如表 1 所示。其中 1g,2g,3g 分别表示单相短路接地、两相短路接地和三相短路故障,表中数字加粗部分为具有风险的扭矩值。

4.2 暂态扭矩放大的风险

4.2.1 暂态扭矩峰值的概率密度

在算例中,选择对转矩 T_{m3} 进行研究,同理可计算其他轴系的扭矩的风险值。

应用 PCM 法,输入参数为故障清除时间,随机输出对应切除时间下发电机轴系的最大扭矩值。所选取的切除时间平均值 $\mu = 0.12$,标准差 $\delta = 0.01$ 。切除时间服从正态分布,计算出关于故障清除时间正态分布为权函数的 4 阶正交多项式组:

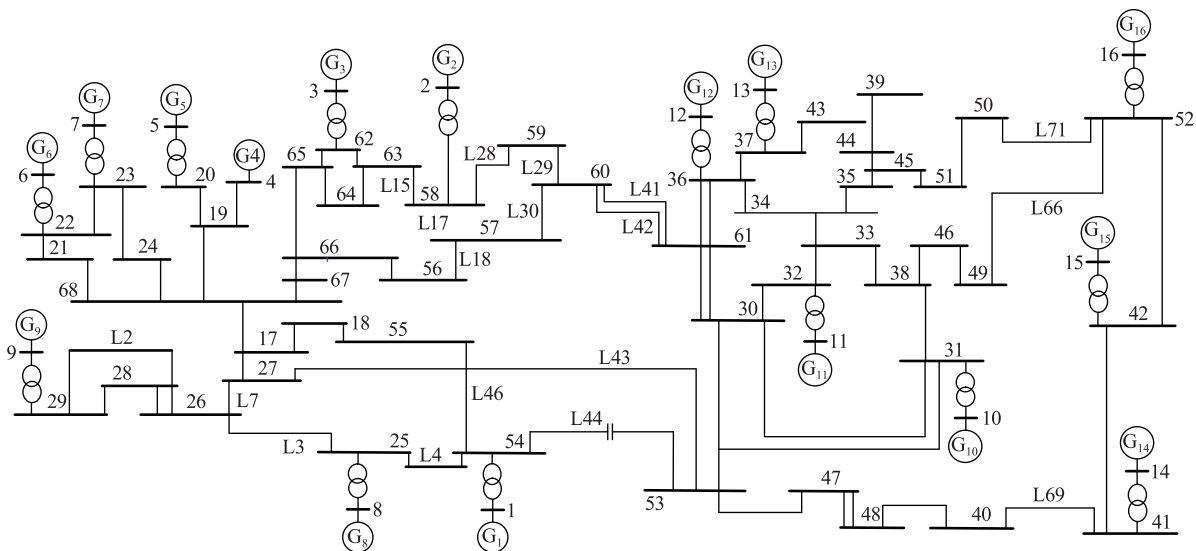


图 1 16 机 68 母线测试系统

Fig.1 16-machine, 68-bus test system

表 1 线路及暂态扭矩峰值

Table 1 Lines and peak transient torque

故障类型	短路点	跳闸线路	T_{m1}	T_{m2}	T_{m3}	T_{m4}	T_{m5}
3g	G ₁ 终端	无	0.679	1.121	2.204	2.786	0.243
1g	母线 54	L4	0.613	1.161	1.523	1.819	0.244
2g	母线 54	L4	0.698	1.315	2.509	2.489	0.314
3g	母线 54	L4	0.907	1.712	3.707	3.018	0.471
2g	母线 54	L46	0.623	1.158	2.064	2.136	0.255
3g	母线 54	L46	0.779	1.334	2.789	2.932	0.359
2g	母线 25	L3	0.652	1.155	1.924	2.527	0.273
3g	母线 25	L3	0.785	1.438	2.508	2.921	0.318
2g	母线 53	L43	0.501	0.995	2.295	2.228	0.265
3g	母线 53	L43	0.593	1.225	2.913	2.945	0.311

$$\begin{cases}
 H_0(t_{cl,ijk}) = 1 \\
 H1(t_{cl,ijk}) = t_{cl,ijk} - 0.12 \\
 H2(t_{cl,ijk}) = t_{cl,ijk}^2 - 0.24t_{cl,ijk} + 0.0143 \\
 H3(t_{cl,ijk}) = t_{cl,ijk}^3 - 0.36t_{cl,ijk}^2 + \\
 \quad 0.0429t_{cl,ijk} - 0.0017 \\
 H4(t_{cl,ijk}) = t_{cl,ijk}^4 - 0.48t_{cl,ijk}^3 + \\
 \quad 0.0858t_{cl,ijk}^2 - 0.006768t_{cl,ijk} + 0.00019875
 \end{cases} \quad (8)$$

假设文中控制误差在 5% 以内,用 PCM 三阶模型可以有效地近似发电机最大转矩和随机切除时间之间的关系。所以选择以 $H_4(t_{cl,ijk})$ 的根作为风速配点。经计算选择 $t_{cl,ijk1} = 0.10$ s, $t_{cl,ijk2} = 0.11$ s, $t_{cl,ijk3} = 0.12$ s, $t_{cl,ijk4} = 0.13$ s 为切除时间配点。这些配点代表给定的故障清除时间正态分布下最可能出现的切除时间,进而在每个切除时间下通过仿真分析得到发电机轴系的最大转矩。

预想故障 $E_i (i = 1, 2, \dots, 86)$ 为发生短路故障导致单条线路开断, i 为线路的编号。以事故 E_{46} 为例,表 2 给出了 IEEE 系统在 $t = 10$ s 时发电机 G₁ 母线 54 侧发生三相接地故障导致 L46 断开情况下,各个配点所对应的暂态扭矩峰值。

表 2 不同配点的暂态扭矩峰值

Table 2 Peak transient torque for different collocations

$t_{cl,ijk}/s$	$T(t_{cl,ijk})/p.u.$	$t_{cl,ijk}/s$	$T(t_{cl,ijk})/p.u.$
0.10	2.789	0.12	1.775
0.11	2.384	0.13	1.931

计算得到三阶 PCM 模型的近似表达式:

$$T(t_{cl,ijk}) = 37040t_{cl,ijk}^3 - 133136t_{cl,ijk}^2 + 1516t_{cl,ijk} - 53.1939 \quad (9)$$

运用随机采样技术,取随机切除时间 5 000 个点,代入式(9),可得相应的 5 000 个最大转矩值。

通过 matlab 中的 Distribution Fitting Tool (dfittool) 工具箱对输出的 5 000 个最大转矩数据进行拟合得到概率密度曲线,进一步分析曲线,获得该概率密度。

4.2.2 暂态扭矩放大的风险计算

假设每条线路的故障频率 $\lambda = 1/86$,即每条线路发生故障的概率 $P_{line}(X_i) = 0.0116$ 。假定线路 46 发生短路故障,则其发生三相短路 $P_{t,4}(Z_{t,4})$,两相接地短路 $P_{t,3}(Z_{t,3})$ 、相间短路 $P_{t,2}(Z_{t,2})$ 、单相接地短路 $P_{t,1}(Z_{t,1})$ 的概率分别为 3.1%, 4.38%, 4.1%, 88.51%^[12]。假设线路各部分发生故障的可能性正比于其长度,将输电线路 43 分为 3 段:线路首端的 20%,线路中间的 60%和线路末端的 20%,并且在各段内故障位置服从均匀分布。

当事故 E_{46} 发生时,通过仿真分析得到,由单相接地、两相、两相接地、三相接地引起 L₄₆ 断开的最大暂态转矩 T_m 分别为 0.903 p.u., 2.182 p.u., 2.204 p.u., 2.789 p.u.。根据前述方法可求出最大转矩 $T(T_{M,ijk})$ 的概率密度 $f_{torq}(T_{M,ijk} | t_{cl,ijk})$ 曲线如图 2 所示。

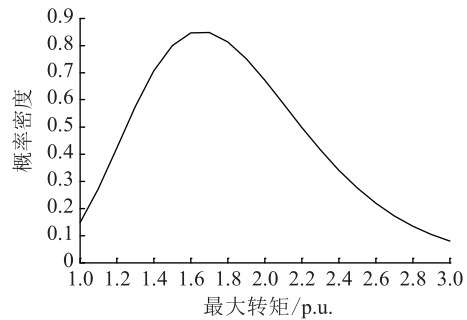


图 2 联合概率密度

Fig.2 Joint probability density

其拟合出的概率密度曲线近似服从逆高斯分布,其概率密度表达式如下:

$$f_{torq}(T_{m,t} | t_{cl,ijk}) = \frac{\sqrt{\lambda}}{\sqrt{2\pi t_{cl,ijk}^3}} e^{-\frac{\lambda(t_{cl,ijk} - \mu)^2}{2\mu^3 t_{cl,ijk}}} \quad (10)$$

式中: λ 为形状参数,分布均值为 μ ,方差为 μ^3/λ ,且 $\mu > 0, \lambda > 0$ 。通过代入求出的参数可得具体的暂态扭矩关于故障切除时间的概率密度函数。将上述求得的量和严重程度函数代入式(7),得到 G₁ 在 E_{46} 情况下的风险值。

同理可获得不同故障各个暂态扭矩的风险值,取最大风险的轴系列入表中,如表 3 所示。表 3 列出了对发电机轴系有损伤的不同故障线路发生不同故障类型下的风险值,不仅可以清楚的反映出发电机 G₁ 各轴系受损的风险值,而且便于比较不同情况下的风险值,从而可知对发电机 G₁ 的轴系危害的不同侧重。

表3 不同故障类型及线路相应的 G_1 各扭矩风险值

类型	短路点	跳闸线路	$R(T_{m1})$ $\times 10^{-3}$	$R(T_{m2})$ $\times 10^{-3}$	$R(T_{m3})$ $\times 10^{-3}$	$R(T_{m4})$ $\times 10^{-3}$	$R(T_{m5})$ $\times 10^{-3}$	$R(G_1)$ $\times 10^{-3}$
1g	母线 54	L4	0	0	0	0	0.014	
2g	母线 54	L4	0.227	0.545	0.457	0	0.268	
3g	母线 54	L4	0.338	0.462	0.740	0.643	0.248	
2g	母线 54	L46	0	0	0	0	0.263	
3g	母线 54	L46	0.015	0.010	0.317	0.651	0.241	1.953
2g	母线 25	L3	0	0.036	0	0	0.003	
3g	母线 25	L3	0.021	0.038	0.051	0.058	0.047	
2g	母线 53	L43	0	0	0.067	0	0.006	
3g	母线 53	L43	0	0.033	0.321	0.323	0.212	
ΣR			0.601	1.124	1.953	1.675	1.302	

4.3 与确定性方法的比较

从表3发现母线54发生单相短路下的 T_{m5} 风险值也有一定影响,虽然从表2发现 T_{m5} 遭受扰动情况下的峰值为0.244,仅比定义的临界值 T_{peak1} 的0.243略大一点,严重程度极小,但是由于综合其发生的概率较大,所以其最终的风险值不可忽略。

表4为利用确定性方法和文中方法对表1和表3中某一对应风险评估值进行对比的结果。观察表4可知,在确定性方法下2种情况对轴系的冲击严重程度对比为5.24%和4.84%,差距不大,但是经文中方法计算得出的风险值却相差一个数量级之大,由于确定性方法只考虑后果的严重程度,假设故障切除时间是一个定值,那么在此时间下的峰值不能够准确反应随机故障切除时间对轴系的冲击影响,而文中考虑了故障切除时间不确定因素对暂态力矩放大的影响,通过对不同的故障切除时间的严重程度和发生的概率卷积计算得出其风险值的大小。

表4 2种风险评估方法的对比

Table 4 Comparison of two risk assessment methods

类型	短路点	跳闸线路	确定性方法	文中方法
3g	母线 54	L46	5.24%	0.651×10^{-3}
3g	母线 25	L3	4.84%	0.058×10^{-3}

观察表1和表3,可知轴系受暂态力矩放大的风险必须综合其概率和严重程度大小。表1的确定性方法虽然可以确定各个故障对轴系产生的影响,但是并没有反映其风险大小,而利用文中方法获得的风险值在确定性的基础上不仅反映了哪些故障会对轴系产生危害,而且突出了各危害的风险值的大小,同时考虑了故障切除时间的影响。

综合上表分析,可知发电机轴系脆弱性风险反

映的是事故发生后引起的暂态扭矩对轴系的冲击效果,从而引起轴系的疲劳损伤,能够更加全面科学地反映系统的薄弱机组以及机组的受损程度和相应的风险值。脆弱性风险值越大的机组,在自然灾害或者重要故障情况下越容易出现事故,越需要加强监视和维护,对于发生概率高,暂态扭矩放大的风险值高的故障应该优先考虑预防抑制措施,而对于其他发生概率小,风险值不高的故障可以采用紧急控制措施。在标准IEEE 16机68节点系统中进行算例分析,说明了该方法的有效性和可行性。

5 结语

风险评估方法充分考虑了电力系统故障切除时间的不确定性、故障类型及发生的概率以及事故产生的严重后果对发电机轴系的脆弱性进行定量评估和预测,有效地克服了确定性评估方法遇到的困难。

文中首先对影响暂态力矩放大的不确定因素进行了分析,然后通过PCM拟合获得暂态扭矩峰值关于故障切除时间的联合概率密度函数,并结合实际电力系统的不确定性因素,从而定量计算发电机遭受暂态扭矩放大的风险指数,有效反映了各发电机轴系脆弱性大小,同时更直观地反映了各机组遭受暂态扭矩放大的风险,为工作人员对发电机轴系的运行、检修和保护提供理论依据和技术支持。

参考文献:

- [1] 陈武晖,毕天姝,杨奇逊,等. 研究暂态扭矩的解析方法[J]. 中国电机工程学报,2010,30(7):70-76.
CHEN Wuhui, BI Tianshu, YANG Qixun, et al. A analytical method for studying transient torque [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 70-76.
- [2] ANDERSON P M, AGRAWAL B L. Subsynchronous resonance in power systems [M]. New York: Wiley-IEEE Press, 1999: 155-185.
- [3] 赵欣,高山,张宇宇. SVC接入位置对次同步振荡的影响机理与SVC控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):107-114.
ZHAO Xin, GAO Shan, ZHANG Ningyu. Influence of SVC location on subsynchronous oscillation and SVC control strategy research [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 107-114.
- [4] 吴照,蒋平. 基于实用稳定域的次同步振荡阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报,2013,33(25):123-129.
WU Xi, JIANG Ping. Subsynchronous damping controller design based on practical stability region [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 123-129.
- [5] 罗剑波,郁琛,谢云云,等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(6): 158-170.

- LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [6] ATIA A, JOVICA V M. Index for ranking generators based on risk of subsynchronous resonance in the network [C] // PowerTeck, Grenoble, 2013.
- [7] ATIA A, JOVICA V M. Methodology for evaluation of risk of subsynchronous resonance in meshed compensated networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(2): 815-823.
- [8] ATIA A, JOVICA V M. Identifying generators at risk of SSR in meshed compensated AC/DC power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4438-4447.
- [9] ANURADHA D, UDAYA D A. Risk-Based dynamic security assessment[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(3): 1302-1308.
- [10] 苏丽宁. 次同步振荡的暂态力矩放大作用研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015.
SU Lining. Study on transient torque amplification of subsynchronous oscillation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2015.
- [11] JI K P, CHUL H K, GYU J C. A novel reclosing algorithm considering turbine generator shaft torque [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 703-712.
- [12] 陈武晖, 王丹辉. 双馈风电场感应发电机效应的安全风险评估方法[J]. 电网技术, 2017, 41(3): 856-862.
CHEN Wuhui, WANG Danhui. Risk-based security assessment method of IGE caused by doubly-fed wind farms [J]. Power System Technology, 2017, 41(3): 856-862.
- [13] VAAHEDI E, LI Wenyuan, CHIA T. Large-scale probabilistic transient stability assessment using bc hydro's on-line tools [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1982, 29(11): 789-796.
- [14] LI Wenyuan. Risk assessment of power systems; models, methods, and applications[M]. New York: IEEE Press, 2005.
- [15] 张帆, 张东辉, 柳勇军, 等. 鲁西背靠背混合直流输电工程引发次同步振荡的风险评估及抑制方法研究[J]. 陕西电力, 2017, 45(4): 30-63.
ZHANG Fan, ZHANG Donghui, LIU Yongjun, et al. Risk assessment and suppression method study on sub-synchronous oscillation resulted from Luxi mixed back-to-back HVDC project [J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(4): 30-63.
- [16] 陈武晖, 毕天姝, 杨奇逊. 模态叠加对次同步谐振暂态扭矩放大的影响[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(28): 1-6.
CHEN Wuhui, BI Tianshu, YANG Qixun, et al. Effect of modal superimposition on transient torque amplification of subsynchronous resonance [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(28): 1-6.
- [17] 翁宗林, 卢继平, 乔梁, 等. 多模式次同步谐振扰动清除时序对轴系扭矩放大的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(7): 1-6.
WENG Zonglin, LU Jiping, QIAO Liang, et al. Impact of fault clearing time on shaft torque amplification in multi-mode subsynchronous resonance [J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(7): 1-6.
- [18] TATANG M A. Direct incorporation of uncertainty in chemical and environmental systems[D]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 1995.
- [19] HOCKENBERRY J R, LESIEUTRE B C. Evaluation of uncertainty in dynamic simulations of power system models: The probabilistic collocation method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1483-1491.
- [20] PREECE R, WOOLLEY N C, MILANOVIC J V. The probabilistic collocation method for power system damping and voltage collapse studies in the presence of uncertainties [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2253-2262.

作者简介:



程欣

程欣(1991),男,硕士,助理工程师,从事变电运维工作(E-mail:824938256@qq.com)。

Risk-based security assessment method considering fault clearing time

CHENG Xin

(Wuxi Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214000, China)

Abstract: Because the power system has many uncertainties, the deterministic method can not evaluate the risk of the shaft of the generator suffer from the transient amplification accurately, this paper presents a risk evaluation method. It takes the influence of fault clearing time on the transient torque into account, and introduces probabilistic collocation method to solve the probability density function of the transient torque. Meanwhile, it also defines the severity function of the transient torque amplification. On this basis, it determines the study area of the shaft of generators suffer from damage, reduces the scope of risk assessment, and thus more comprehensive and accurate risk assessment results is obtained. Finally, The results of calculation example of typical IEEE 16-machine 68-bus system show that the proposed assessment strategy is effective and practical.

Keywords: transient torque amplification; probabilistic collocation method; risk assessment

(编辑 方晶)