不确定条件下计及线路保护动作特性的电压暂降频次评估

叶 曦,刘开培,李志伟

(武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072)

摘要:线路保护的动作时限将直接影响电压暂降的重要指标之一——持续时间。针对线路发生故障的情况, 对不同动作时限特性的线路保护装置对电压暂降幅值与持续时间的影响展开了研究。计算线路单端跳闸而 故障未消除时的多级电压暂降幅值,并根据线路保护的动作特性和故障位置确定电压暂降幅值区间以及不 同线路、相同电压暂降区间内的电压暂降持续时间。基于蒙特卡罗模拟法研究不确定条件下的故障信息概 率模型,结合保护动作特性对电压暂降幅值及持续时间的影响提出了不确定条件下的计及线路保护动作特 性的电压暂降频次评估计算模型,同时考虑故障信息随机性及线路上不同保护类型动作特性对目标节点进 行分析,给出包含电压暂降持续时间信息的年均预期电压暂降频次。标准 IEEE 14 节点系统的仿真结果证 明了所提计算方法的正确性和有效性。

关键词:电压暂降;线路保护;保护动作时限;蒙特卡罗模拟;持续时间;频次评估

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.03.023

0 引言

中图分类号:TM 773

电压暂降是电力系统中影响最严重的动态电能 质量问题之一[1-3]。敏感设备对电压暂降幅值和暂 降持续时间呈现复杂的关系,在电压暂降频次评估 中计及暂降持续时间是非常重要的^[4-5]。目前国内 外学者从不同的角度对电压暂降评估方法进行了研 究:文献[6]将故障点视为系统新增虚拟节点来求 解电压跌落幅值,进而对复杂电网电压暂降频次进 行评估:文献[7]则针对复杂电网中发生多重故障 时的电压暂降评估方法进行了研究,提出了相应的 计算模型;文献[8]基于 PSCAD 对含分布式电源的 典型配电网进行仿真计算,运用蒙特卡罗法对含有 分布式电源配电网的电压暂降进行不确定性评估, 扩展了电压暂降评估的适用范围;文献[9]利用最 大熵理论确定线路故障概率密度函数,对由线路故 障引起的电压暂降问题进行了分析;此外,由于系统 中性点接地方式不同,发生短路故障引起的本电压 等级的相电压和线电压暂降的幅值和持续时间会有 很大区别,文献[10]分析了中性点有效接地系统和 非有效接地系统的电压暂降特征;文献[11-13]考虑 了变压器绕组联结方式、电力系统运行方式以及负 荷模型等因素对电压暂降频次评估的影响。但目前 在进行电压暂降评估时大多注重对暂降幅值的分 析,并未对暂降持续时间进行深入的分析评估,而仅 简单认为暂降持续时间为定值;在不确定性评估中 也仅假定暂降持续时间简单服从某一均匀分布或正 态分布,显然这也不能很好地反映实际情况。

随着电压暂降评估研究的深入,国内外学者开 始关注保护装置动作特性对暂降持续时间的影响。 文献[14]研究了保护装置及重合闸配合动作对敏

收稿日期:2017-01-23;修回日期:2017-10-25

感负荷的扰动情况。文献[15]认为电压暂降对敏 感过程的影响与系统的过程暂降免疫力有关,并研 究了过程免疫时间与三段式电流保护定值之间的关 系,提出通过利用过程免疫时间优化保护缓减电压 暂降。文献[16]提出敏感设备的电压暂降敏感度 不仅取决于暂降幅值,还与暂降持续时间有关,同时 指出线路保护时限特性决定了电压暂降持续时间, 但未分析保护动作时限与暂降持续时间之间的对应 关系,仅简单假设全线路上任意位置故障的清除时 间为一定值。文献[17]分析了保护动作时限与暂 降持续时间之间的一般性对应关系,对考虑保护时 限特性的电压暂降频次进行了评估,使得评估结果 更加准确完善。但其采用的确定性评估方法未能很 好地模拟故障发生的随机情况,同时文中仅就系统 中所有线路保护是单种保护类型情况下所导致的电 压暂降频次及暂降持续时间的差异进行了分析,而 没有分析系统中同时存在多种保护类型时对电压暂 降频次评估结果的影响。

本文分析了电网中不同保护类型的动作特性 对电压暂降持续时间的影响,同时考虑线路故障发 生的随机性,提出了一种计及线路保护动作特性的 电压暂降频次评估方法。该方法采用蒙特卡罗模 拟法对不确定性条件下的电压暂降进行频次评 估,根据线路中不同保护装置的时限特性以及蒙 特卡罗抽样信息确定电压暂降幅值区间以及相 同幅值区间内的不同暂降持续时间;在此基础上 给出了电网中目前节点发生的具有不同暂降持 续时间及暂降幅值区间的电压暂降频次计算公 式;给出了计及线路继电保护动作特性的不确定 条件下电压暂降频次评估模型及其流程;在 IEEE 14 节点标准系统中进行仿真,验证了所提方法的 实用性和有效性。

1 继电保护动作特性对电压暂降评估的影响

1.1 不同保护类型的动作特性

不同的保护装置具有不同的保护方式、保护范 围和动作时限,且不同的故障位置也会导致同一线 路上断路器的动作时间不同,从而直接导致各节点 电压跌落持续时间的不同。

a. 阶段式电流保护。

距离保护与过流保护均属于阶段式电流保护,其 工作原理均以单侧电气量作为保护动作的判据,因而 无法区分本线路末端和相邻线路首端的故障,故使用 阶段式保护方式来保证选择性。阶段式电流保护的 典型动作时限如图 1 所示。保护 I 段可瞬时动作,动 作时限为 t_1 ,其保护范围按距离保护与过流保护的特 性分别为线路全长的 80%~85%和 55%~65%;保护 II 段可以保护线路全长但不能超过相邻线路的 I 段保护 范围,其动作时限 t_2 相比 I 段动作时限会有 Δt 的延 时,即 $t_2=t_1+\Delta t$;保护 III 段除保护本段线路外还可保 护相邻线路的全长,其动作时限 $t_3=t_2+\Delta t$ 。



图 1 阶段式电流保护动作时限

Fig.1 Action time of stage current protection

b. 纵联差动保护。

纵联差动保护利用通信装置同时对线路两端的 电气量进行比较来作为保护动作的判据,理论上具 有绝对的选择性,其动作时限如图 2 所示。当线路 i-j上任意点发生故障时,经过固有动作时限 t_0 后保 护装置动作跳开线路两侧断路器 QF₁ 和 QF₂,达到 切除故障的目的。



图 2 纵联保护动作时限



1.2 继电保护动作特性对电压暂降频次评估的影响

目前,配电网的拓扑结构均呈辐射状且由单电 源供电,网络潮流流向单一,保护装置动作特性仅仅 影响电压暂降持续时间。而在多端供电的复杂电网 中,网络结构、潮流流向呈现多样性,此时保护动作 特性不仅会影响电压暂降持续时间,还会对电压暂 降幅值产生影响。

图 3 为复杂电网中某一线路的阶段式继电保护 装置动作区域示意图,其中 D_1 为该保护装置 1 段 保护范围,该装置的动作特性将线路全长分为 3 个 区域:区域 1,区域 2,区域 3。当区域 2 范围内发生 故障时,线路两侧断路器 QF₁和 QF₂ 经时间 t_1 同时 动作切除故障,然后系统恢复正常;而当故障发生在 区域 1 和 3 时,线路两端的断路器 QF₁和 QF₂将会间 隔 Δt 时间先后断开,这样直接导致故障被完全清除 前 网络的拓扑结构发生改变,引起多级电压 暂降^[17]。



图 3 阶段式保护装置动作区域示意图 Fig.3 Action region schematic diagram of

stage protection device

图 4 为多级电压暂降示意图。当故障发生在两 侧保护的 I 段动作区域内(区域 2)时,两侧保护装 置同时动作切除故障,此时只经历一次电压暂降,暂 降持续时间为保护的 I 段动作时间 t_1 。当故障发生 在一侧保护Ⅰ段动作区域与另一侧Ⅱ段动作区域 之间(区域1和3)时,故障初期线路两端保护动作 前短路电流由电路两端点流向故障点,暂降后的电 压幅值较小(图 4 中 U_1),此阶段的暂降持续时间即 为保护 I 段保护动作时间 t₁:然后靠近故障点的保 护装置 I 段保护动作断开断路器,而远离故障点的 保护装置 Ⅱ 段保护动作之前,短路电流由线路单端 提供,暂降后的电压幅值有所回升(图4中U₂)。当 远离故障点的保护装置 II 段保护经时间 t,动作后完 全切除故障使系统恢复正常电压水平,此阶段的暂 降持续时间为 $t'=t_2-t_1$ 。假设后续重合闸成功则此 时该线路总共经历2次不同幅值与持续时间的电压 暂降。





2 不确定条件下的电压暂降频次评估

当前的电压暂降评估方法大多针对特定的网络 拓扑结构和运行方式,或者只考虑某一种不确定性 因素对评估指标的影响。基于确定性分析的电压暂 降评估算法难以处理各种随机性问题。电压暂降的 概率模拟就成为不确定条件下节点电压暂降随机预 估的有效手段。

本文考虑电压暂降评估中故障线路、故障线路上的故障位置及故障类型等多种不确定性因素,用蒙特 卡罗评估法对电压暂降进行概率性随机预估,得到年 均预期暂降频次 ESF(Expected Sag Frequency),同时 结合保护动作时限特性,得到不确定条件下计及线路 保护动作特性的电压暂降频次评估结果。

2.1 基于蒙特卡罗模拟的故障信息概率模型

a. 故障线路概率模型。

由于电力网络中的线路发生故障属于随机事件,因此可用随机抽样方法产生故障线路;同时假定 线路中每段的故障率相同,则每次故障在该条线路 发生的概率与线路长度呈正比关系。设 L_m为第 m 条线路的长度,L_{total}为电力网络中线路总长度,M 为 网络中线路的总数,则整个网络中第 m 条线路发生 故障的概率 P(m)满足:

$$P(m) = \frac{L_m}{L_{\text{total}}}, \ \sum_{m=1}^{M} P(m) = 1$$
(1)

设随机变量 x_1 服从[0,1]上的均匀分布,基于 蒙特卡罗抽样方法,其对应的故障线路编号 F_{line} 可 表示为:

$$F_{\text{line}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_1 \leq P(1) \\ 2 & P(1) < x_1 \leq P(1) + P(2) \\ \vdots \\ M & \sum_{m=1}^{M-1} P(m) < x_1 \leq 1 \end{cases}$$
(2)

b. 故障类型概率模型。

本文考虑单相接地故障、两相短路故障、两相短路技能故障以及三相短路故障。定义*i*取值为1、2、3、4分别表示上述4种故障类型,其将区间[0,1]分成了4个区间,每个区间长度为*D_i*,*P_f*(*i*)为第*i*种故障类型发生的概率,则有:

$$D_i = P_f(i), \ \sum_{i=1}^4 D_i = 1$$
 (3)

设随机变量 x₂服从[0,1]上的均匀分布,基于 蒙特卡罗抽样方法,故障发生时其对应的线路故障 类型 P_{type}可表示为:

$$P_{\text{type}} = \begin{cases} 1 & 0 \leq x_2 \leq P_{\text{f}}(1) \\ 2 & P_{\text{f}}(1) < x_2 \leq P_{\text{f}}(1) + P_{\text{f}}(2) \\ 3 & P_{\text{f}}(1) + P_{\text{f}}(2) < x_2 \leq & (4) \\ P_{\text{f}}(1) + P_{\text{f}}(2) + P_{\text{f}}(3) \\ 4 & P_{\text{f}}(1) + P_{\text{f}}(2) + P_{\text{f}}(3) < x_2 \leq 1 \end{cases}$$

$$c. \text{ bl \text{left}} \text{ bl \text{deft}} \text{ bl \text{deft}} \text{ bl \text{deft}}$$

本文中的故障位置指发生故障的线路中故障点 到线路首端的距离与整条线路长度的比值,用*ξ_{ij}表示* 线路*i-j*上的故障位置,假设线路上所有位置发生故 障的概率是随机且均等的,则有 ξ_{ii} ~U(0,1)。

2.2 基于蒙特卡罗模拟的故障信息概率模型

图 5 为 N 节点网络故障示意图。图中,f 为线路 i-j上的故障点; l_{ij} 和 l_{ij} 分别为故障点f 到线路首端i的距离以及线路全长;p 为网络中任一待分析节点; Z_f 为故障过渡电阻。当点f发生故障(以两相短路故障 为例时),待分析节点p 的三相电压可表示为:

$$\boldsymbol{U}_{p,\Lambda} = \boldsymbol{U}_{p,\Lambda}^{0} - \frac{Z_{ff}^{1} - Z_{ff}^{2}}{Z_{ff}^{1} + Z_{ff}^{2} + 2Z_{f}} \boldsymbol{U}_{f,\Lambda}^{0}$$
(5)

$$\boldsymbol{U}_{p,B} = \alpha^2 \boldsymbol{U}_{p,A}^0 - \frac{\alpha^2 Z_{pf}^1 - \alpha Z_{pf}^2}{Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2 + 2Z_f} \boldsymbol{U}_{f,A}^0 \qquad (6)$$

$$\boldsymbol{U}_{p,C} = \alpha^2 \boldsymbol{U}_{p,A}^0 - \frac{\alpha Z_{pf}^1 - \alpha^2 Z_{pf}^2}{Z_{ff}^1 + Z_{ff}^2 + 2Z_f} \boldsymbol{U}_{f,A}^0$$
(7)

其中, $U_{p,A}$ 、 $U_{p,B}$ 、 $U_{p,C}$ 分别为点f处发生两相短路故 障时待分析节点p的A、B、C 三相电压相量; $U_{p,A}^{0}$ 、 $U_{f,A}^{0}$ 分别为故障前节点p与故障点f的A相电压相 量; $\alpha = e^{j\frac{2}{3\pi}}$ 为旋转因子; Z_{pf} 、 Z_{ff} 分别为故障点f与节 点p的互阻抗及点f的自阻抗。

$$Z_{pf} = (1 - \xi_{if}) Z_{if} + \xi_{if} Z_{fj}$$
(8)
$$Z_{ff} = (1 - \xi_{if})^2 Z_{ii} + 2 \xi_{if} (1 - \xi_{if}) Z_{ij} +$$

$$\xi_{if}^{2}Z_{jj} + \xi_{if}(1 - \xi_{if})Z_{ji}$$
(9)

其中, Z_{ij} 为线路 i-j 的线路阻抗。



图 5 N 节点网络故障示意图

Fig.5 Schematic diagram of fault in N-node network

2.3 考虑保护动作特性的多级电压暂降评估模型

在采取阶段式继电保护的线路中,线路上发生 故障的位置将直接影响电压暂降特性。当故障发生 在两侧保护的 I 段动作区间内时,两侧保护装置同 时动作切除故障,此时只经历 1 次电压暂降;当故障 发生在一侧保护 I 段范围与另一侧 II 段保护范围 之间时,两侧断路器间隔时间 Δt 动作将引起多级电 压暂降。线路一侧保护 I 段动作而故障未消除至 另一侧保护 II 段动作切除故障过程中,线路处于单 端跳闸状态,导致网络拓扑结构发生变化,需重新计 算该状态下的电压暂降幅值^[18]。

线路单端跳闸示意图如图 6 所示。发生单端跳闸 时,原有节点*i*由于线路保护动作而产生了一个新增虚 拟节点*i**,对于此时的故障位置参数*ξ_i**有如下关系: (10)



图 6 线路单端跳闸示意图

Fig.6 Schematic diagram of single-ended tripping of transmission line

此时,故障点f与节点p的互阻抗 Z_{μ} 及f点的 自阻抗 Z_{f} 可表示为:

$$Z'_{pf} = \xi^*_{ij} Z'_{i^*f} + (1 - \xi^*_{ij}) Z'_{fj}$$
(11)

$$Z'_{ff} = \xi_{ij}^{*2} Z'_{i^*i^*} + 2 \xi_{ij}^{*} (1 - \xi_{ij}^{*}) Z'_{i^*j} +$$

$$(1 - \xi_{ij}^*)^2 Z_{jj}' + \xi_{ij}^* (1 - \xi_{ij}^*) Z_{i*j}$$
(12)

其中, *Z_{i*j}* 为新增虚拟节点 *i** 与节点 *j* 之间的线路 阻抗。

重新生成新的节点阻抗矩阵后,计算电压暂降 幅值的公式与式(5)—(7)类似,不再复述。

2.4 电压暂降频次评估计算流程

考虑到电压暂降评估过程中的各种不确定性因 素,本文用蒙特卡罗模拟法来评估待分析节点的电 压暂降频次,同时考虑线路保护动作特性对电压暂 降幅值及暂降持续时间的影响。待分析节点的年均 预期暂降频次可以描述为:

$$ESF_{(p)} = \sum_{N_{\text{line}}=1}^{N} \sum_{F_{\text{type}}=1}^{4} F(U_{p} \leq U_{c}, \\ \xi_{\text{line}} \in [0, 1 - D_{1}] \cup [D_{1}, 1], T_{d} = t_{1}) + \\ \sum_{N_{\text{line}}=1}^{N} \sum_{F_{\text{type}}=1}^{4} F(U_{p} \leq U_{c}, \xi_{\text{line}} \in [1 - D_{1}, D_{1}], \\ T_{d} = t_{1}, t_{2}, t_{2} - t_{1})$$
(13)

其中,ESF_(p)为待分析节点 p 的年均预期暂降频次; N_{line} 为待分析网络的线路编号;N 为网络中的线路总数; F_{type} 为短路故障类型; U_p 为节点 p 的电压暂降幅值; U_c 为电压暂降事件的电压阈值,一般取为额定值的 90%; ξ_{line} 为线路上的故障位置参数; T_d 为电压暂降持续时间。式(13)充分考虑了线路保护动作特性对电压暂降幅值与持续时间的影响,并且故障线路、故障类型、线路上的故障位置参数均由蒙特卡罗仿真产生,以期模拟实际故障中的随机情况。

不确定条件下的计及线路保护动作特性的电压 暂降频次评估流程如图7所示。

3 算例分析

为了验证本文所提不确定条件下的计及线路保



图 7 电压暂降频次评估流程

Fig.7 Frequency assessment flowchart of voltage sag

护动作特性的电压暂降频次评估方法的有效性,将 该方法应用于标准 IEEE 14 节点输电网络中。目标 网络中共有节点 14 个、输电线路 15 条、变压器 3 台、发电机 2 台^[19],其网络拓扑结构如图 8 所示。 所有变压器的连接方式均为 Y_N/y_{n0} 型,系统采用中 性点直接接地方式,发电机的正序、负序和零序电抗 分别为 0.30 p.u. 、0.30 p.u. 、0.05 p.u.。



图 8 标准 IEEE 14 节点系统

Fig.8 Standard IEEE 14-bus system

为了充分考虑保护动作时限特性对电压暂降持 续时间的影响,需将每条线路采用的保护类型进行 分类,分类结果如表1所示;同时设定不同保护动作的时限值如表2所示;假设线路上所发生的所有故障中三相短路、两相短路接地、两相短路以及单相接地故障所占的比例如表3所示;所有线路上年故障发生频率为0.080次/km。

本文设置蒙特卡罗仿真次数为1000次,对系 统中几个需要考察的敏感设备接入的节点1、5、9、

表1 线路保护分类

Table 1	Classification of line protection
保护类型	线路
距离保护	1-2,2-3,2-5,4-5,6-11,6-13,9-14
过流保护	1-5,2-4,3-4,6-12,9-10,10-11
纵联差动保护	11-13,13-14

表 2 不同保护类型的动作时限特性

Table 2	Action	time	of	different	protection	types
10010 -	11001011		· · ·	amorone	protoction	17 P 00

保护类型	动作时限/ms	保护类型	动作时限/ms
相间距离 I 段	20	相间过流 I 段	80
相间距离 Ⅱ 段	110	相间过流 Ⅱ 段	250
相间距离 Ⅲ 段	300	相间过流 Ⅲ 段	360
接地距离 I 段	150	接地过流 I 段	160
接地距离 Ⅱ 段	290	接地过流 Ⅱ段	270
接地距离 Ⅲ 段	300	接地过流 Ⅲ 段	260
纵联差动保护	20		

表 3 不同故障类型所占比例 Table 3 Proportion of different fault types

ruble 5 Troportion of	unierenii iuun ty	pes
故障类型 所占比例/%	故障类型	所占比例/%
单相短路接地 78	两相短路接地	7
两相短路 11	三相短路	4

12 进行了电压暂降频次评估。考虑保护动作时限 对电压暂降持续时间及幅值的影响,节点1与节点9 的电压暂降频次评估结果分别如表4、表5所示(表 中电压暂降幅值为标幺值,表头中数据为保护装置 的动作时限)。

从表4、5可以看出,待分析节点不同其电压暂 降频次评估结果存在较明显差异,同一暂降幅值区 间对应不同的暂降持续时间,若简单设定暂降持续 时间为一定值,必然会导致评估结果的不准确。节 点1、5、9、12电压暂降频次评估结果的三维图如图9 所示(电压暂降幅值为标幺值,后同)。

对比图 9 中节点 1、5、9、12 的电压暂降频次评 估结果不难看出,考虑了相应线路的保护动作时限 后,不同节点的电压暂降频次呈现显著差异,这使得 电压暂降评估结果更加准确。同时对节点 5 由上述 4 种故障类型所导致的电压暂降频次进行评估,结 果如图 10 所示。

表 4 节点 1 电压暂降频次评估结果 Table 4 Voltage sag frequency assessment results of Node 1

电压暂降						电压暂降	频次					
幅值范围	20 ms	25 ms	30 ms	80 ms	90 ms	110 ms	120 ms	135 ms	$150 \mathrm{\ ms}$	160 ms	170 ms	250 ms
(0,0.1]	0	0.006 6	0.423 6	0.047 1	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.1,0.2]	0.047 1	0.188 3	0.188 3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.2,0.3]	0.188 3	0.188 3	0.517 8	0.047 1	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.3,0.4]	0.094 1	0.517 8	0.706 1	0	0	0	0.094 1	0	0	0	0	0
(0.4,0.5]	0.141 2	1.176 8	0.847 3	0.141 2	0	0	0.046 8	0.019 6	0	0	0	0
(0.5,0.6]	0.376 6	1.600 4	1.035 6	0.470 7	0	0.047 5	0	0	0	0	0	0
(0.6,0.7]	0.423 6	4.942 5	1.412 2	1.035 6	0.046 7	0	0	0.045 8	0	0	0.141 2	0
(0.7,0.8]	0.141 2	1.835 8	0.659 0	0.329 5	0	0	0	0.094 1	0	0	0.094 1	0
(0.8,0.9]	0.517 8	0.988 5	0.470 7	0.328 7	0.141 2	0	0.659 0	1.035 6	0	0	0.235 4	0

- 表う 节点り电压哲隆频次评估

Table 5 Voltage	sag	frequency	assessment	results	of	Node	9
-----------------	-----	-----------	------------	---------	----	------	---

电压暂降						电压暂降	频次					
幅值范围	20 ms	$25 \mathrm{\ ms}$	30 ms	$80 \mathrm{ms}$	90 ms	110 ms	120 ms	$135 \mathrm{\ ms}$	$150 \mathrm{\ ms}$	$160 \mathrm{\ ms}$	$170 \mathrm{\ ms}$	250 ms
(0,0.1]	0	0.047 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.1,0.2]	0	0.047 0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.2,0.3]	0	0.141 2	0.188 3	0.046 9	0	0	0	0	0	0	0	0
(0.3,0.4]	0.093 7	1.129 7	0.376 6	0.094 1	0	0	0.094 1	0	0	0.141 2	0	0
(0.4,0.5]	0.282 4	1.835 8	0.800 2	0.047 1	0	0	0.046 8	0	0	0	0	0
(0.5,0.6]	0.329 5	3.295 0	2.871 4	0.470 7	0	0	0	0	0	0	0.046 6	0
(0.6,0.7]	1.647 5	5.601 6	2.118 2	1.223 9	0.046 7	0	0	0.141 2	0	0	0.047 1	0
(0.7,0.8]	2.024 1	0.894 4	0.423 6	0.423 4	0.047 5	0	0.047 1	1.129 7	0	0	0.188 3	0.235 4
(0.8,0.9]	0.517 3	0.047 1	0	0.047 0	0.141 0	0	0.093 8	0.706 1	0	0	0.047 7	0

174



分析图 10 所示仿真结果不难看出,不同故障 类型对应的电压暂降频次的评估结果差异显著,这 主要是由每种故障发生的概率差异和各种故障类 型下线路保护装置所对应的动作特性的不同导 致的。

4 结论

本文考虑实际网络中多种类型保护装置的动作 原理及时限特性,研究了其对电压暂降持续时间的 影响,并对线路两端断路器先后断开导致电网拓扑 结构改变而引起的多级电压暂降幅值进行了计算分 析,以此为基础确定相应的电压暂降幅值区间以及 不同线路相同区间内不同的暂降持续时长。基于蒙 特卡罗方法建立故障线路、故障线路上的故障位置 以及故障类型等多种不确定性因素的故障信息概率 模型,进一步结合线路上不同的保护动作时限特性 提出了不确定条件下的计及线路保护动作特性的电 压暂降频次评估计算方法,以求得目标节点的年均 预期暂降频次。对标准 IEEE 14 节点系统的评估结 果表明,本文所提考虑线路保护动作特性的电压暂 降不确定性频次评估使得暂降幅值和暂降持续时间 的对应关系更加明确,也更符合实际。

本文所提不确定条件下的计及线路保护动作特 性的电压暂降频次评估计算方法可以对系统中任意 节点进行分析,所得评估结果也可为后续电力管理 部门制定敏感负荷接入点等降低电压暂降危害的措 施提供理论依据。

参考文献:

[1] 瞿硕,黄纯,江亚群,等. DVR 电压暂降检测新方法[J]. 电工技 术学报,2013,28(4):234-239.

QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Yaqun, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4):234-239.

- [2]杨京燕,倪伟,肖湘宁,等. 计及电压暂降的配网可靠性评估
 [J].中国电机工程学报,2005,25(18):28-33.
 YANG Jingyan, NI Wei, XIAO Xiangning, et al. Reliability evaluation of distribution network considering voltage sags [J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(18):28-33.
- [3] MILANOVIE J V, AUNG M T, CUPTA C P. The influence of fault distribution on stochastic prediction of voltage sags [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1):278-285.
- [4] 雷刚,顾伟,袁晓冬,等.考虑系统与敏感负荷兼容性的电压暂降指标[J].电工技术学报,2010,25(12):132-138.
 LEI Gang, GU Wei, YUAN Xiaodong, et al. A voltage sag index considering compatibility between system and sensitive equipment
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(12): 132-138.
- [5] COSTA F B, DRIESEN J. Assessment of voltage sag indices based on scaling and wavelet coefficient energy analysis [J]. IEEE Tran-

sactions on Power Delivery, 2012, 28(1): 336-346.

- [6] 王东旭,乐健,刘开培,等. 基于虚拟节点的复杂电网电压跌落 随机评估方法[J]. 电工技术学报,2011,26(8):190-197.
 WANG Dongxu, LE jian, LIU Kaipei, et al. Stochastic assessment method of voltage dip in complex power grid based on virtual bus
 [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2011,26(8): 190-197.
- [7] 王东旭,乐健,刘开培,等. 复杂电网多重故障条件下的电压暂 降分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):101-106.
 WANG Dongxu, LE Jian, LIU Kaipei, et al. Voltage dip analysis for multiple faults case in complex power grid[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(7):101-106.
- [8]代双寅,韩民晓,严稳莉.含分布式电源的配电网电压暂降评估
 [J].电网技术,2011,35(7):145-149.
 DAI Shuangyin, HAN Minxiao, YAN Wenli. Voltage sag assessment for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology,2011,35(7):145-149.
- [9]肖先勇,马超,李勇. 线路故障引起电压暂降的频次最大熵评估
 [J].中国电机工程学报,2009,29(1):87-93.
 XIAO Xianyong, MA Chao, LI Yong. Voltage sags occurrence frequency assessment caused by line faults using the maximum entropy method[J]. Proceedings of the CSEE,2009,29(1):87-93.
- [10] 肖湘宁,陶顺. 中性点不同接地方式下的电压暂降类型及其在 变压器间的传递(一)[J]. 电工技术学报,2007,22(9): 143-147.

XIAO Xiangning, TAO Shun. Voltage sags types under different grounding modes of neutral and their propagation:part I [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(9):143-147.

- [11] PARK C H, JANG G, THOMAS R J. The influence of generator scheduling and time-varying fault rates on voltage sag prediction
 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23 (2): 1243-1250.
- [12] MILANOVIĈ J V, GNATIV R, CHOW K W M. The influence of loading conditions and network topology on voltage sags [C] // Ninth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Orlando, FL, USA: IEEE, 2000:757-762.
- [13] 杨晓东,李庚银,周明. 计及负荷特性的电压暂降随机预估[J].
 电力系统自动化,2009,33(15):84-88.
 YANG Xiaodong, LI Gengyin, ZHOU Ming. Stochastic estimation method of voltage sags considering load characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(15):84-88.
- [14] 张国华,杨京燕,张建华,等. 计及电压暂降和保护性能的配电 网可靠性算法[J]. 中国电机工程学报,2009,29(1):28-34.
 ZHANG Guohua, YANG Jingyan, ZHANG Jianhua, et al. Arithmetic of distribution network reliability calculation in consideration of voltage sags and protective relays[J]. Proceedings of the CSEE,2009, 29(1):28-34.
- [15] 李丹丹,肖先勇,刘阳,等.利用过程免疫时间优化保护的电压 暂降缓减方案[J].电力自动化设备,2014,34(9):95-100.
 LI Dandan,XIAO Xianyong,LIU Yang, et al. Voltage sag mitigation scheme using protection optimization with process immunity time
 [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(9):95-100.
- [16] 肖先勇,王希宝,薛丽丽,等. 敏感负荷电压凹陷敏感度的随机

估计方法[J]. 电网技术,2007,31(22):30-33.

XIAO Xianyong, WANG Xibao, XUE Lili, et al. A method to stochastically estimate voltage sag sensitivity of sensitive equipments [J]. Power System Technology, 2007, 31(22): 30-33.

- [17] 陈礼频,肖先勇,张志,等.考虑保护时限特性的电压暂降频次 评估[J].电力系统保护与控制,2013,41(2):113-119.
 CHEN Lipin,XIAO Xianyong,ZHANG Zhi, et al. Voltage sags frequency assessment considering the time characteristic of protection system[J]. Power System Protection and Control, 2013,41(2): 113-119.
- [18] 兰剑,王东旭,叶曦,等. 故障线路单端跳闸条件下节点电压暂 降幅值计算方法[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):78-82.
 LAN Jian,WANG Dongxu,YE Xi, et al. Calculation of voltage sag amplitude for single-terminal trip of faulty line[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):78-82.

[19] IEEE. IEEE 14-bus test case [EB/OL]. [2016-10-20]. http:// www.ee.washington.edu/resea-rch/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm.

作者简介:



叶 曦(1989—),男,湖北武汉人,博 士研究生,主要研究方向为有源配电网电 能质量(E-mail:leslit@whu.edu.cn); 刘开培(1962—),男,湖北荆门人,教 授,博士研究生导师,主要研究方向为电能

质量分析与控制(E-mail:kpliu@whu.edu. cn);

李志伟(1993—),男,安徽阜阳人,硕士研究生,主要研究 方向为有源配电网网络经济优化调度(E-mail:672010661@ qq.com)。

Voltage sag frequency assessment considering action characteristics of line protection in uncertain conditions

YE Xi, LIU Kaipei, LI Zhiwei

(College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: The action time of line protection directly affects one of the important indexes of voltage sag:duration time. Aiming at the condition of line faults, the effects of different action time characteristics of line protection devices on the voltage sag amplitude and duration time is studied. The multi-level voltage sag amplitudes are calculated when the protection device at single-terminal transmission line is tripped while the fault is not eliminated. The interval of voltage sag amplitude and voltage sag duration time of different lines in the same voltage sag interval are determined according to the action characteristics of line protection and fault location. The statistical model of fault information in uncertain conditions is established based on Monte Carlo simulation method and the calculation method of voltage sag frequency assessment considering action characteristics of protection on voltage sag amplitude and duration time. The objective node is analyzed and the average annual expected voltage sag frequency including the information of voltage sag duration time is calculated, considering the randomness of fault information and action characteristics of different types of line protection. Simulative results of standard IEEE 14-bus system verify the validity and efficiency of the proposed calculation method.

Key words:voltage sag; line protection; protection action time; Monte Carlo simulation; duration time; frequency assessment