故障线路单端跳闸条件下节点电压暂降幅值计算方法

兰 剑[1,2],王东旭[1,2],叶 曦[1],刘开培[1]

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;
2. 国网湖北省电力公司武汉供电公司,湖北 武汉 430072)

摘要:考虑继电保护装置动作对网络拓扑造成的影响,研究了保护装置动作造成故障线路单端跳闸而故障仍未消除情况下的电压暂降幅值的计算方法。首先分析了由于线路故障产生的虚拟节点与单端跳闸产生的伴随节点对电力网络拓扑结构变化的影响,基于此重构了电力网络的节点导纳矩阵与节点阻抗矩阵,利用这 2 个矩阵计算节点的电压暂降幅值。利用所提方法对 IEEE 14 节点系统的节点暂降电压进行了计算,计算结果和 PSCAD 仿真结果基本相同,验证了所提方法的正确性。

关键词:继电保护;电压暂降;线路故障;故障分析;单端跳闸;阻抗矩阵;模型;计算;电力网络拓扑

中图分类号:TM 744;TM 77 **文献标识码**:A DOI:10.3969/j.issn.1006-6047.2014.08.014

0 引言

分析计算电压暂降幅值和持续时间等电压暂降特征量是进行电压暂降评估分析的基础[1-4]。对于不同的电压暂降幅值与持续时间,敏感设备的敏感程度有显著差异[5-6]。现有的电压暂降评估方法多角度分析了电压暂降特征量:文献[7]分析估算了配电网的电压暂降幅值;文献[8]考虑了系统节点处发生故障与输电线路上发生故障 2 种情况,分别提出了适用于上述故障情况的电压暂降幅值计算方法;文献[9]探讨了在系统发生多重故障条件下电压暂降幅值的计算方法。然而,上述文献在研究电压暂降幅值时均假设故障线路两端的断路器不动作,即网络结构不发生变化,而电网中继电保护装置的作用决定了这种假设不符合电力系统实际运行情况。文献[10-11]基于上述研究考虑了电压暂降情况下保护动作的影响,认为环网线路发生短路故障时,两端断路器先后断开到故障清除前电网的拓扑结构发生变化,会引起多级电压暂降,但其并未深入分析拓扑结构的变化规律及如何计算此过程的暂降幅值。

本文在上述文献的研究基础上,考虑继电保护装置动作的影响,以电力网络短路或接地故障导致的电压暂降问题为研究对象,提出一种考虑到当输电线路发生故障时,系统中继电保护装置动作跳开故障所在线路的一侧断路器而故障仍未消除情况下的电压暂降幅值计算方法。该方法以文献[8]中基于虚拟节点的电压暂降幅值计算方法为基础,将故障点看成虚拟节点,将跳闸后新增的端点看成伴随节点,对保护装置动作使线路单端跳闸前后电力网络的拓扑结构变化进行了分析。考虑到伴随节点的影响,对整个电力网络的节点导纳矩阵进行了重构,并给出了其中变化元素的计算方法,推导出了在线路单端跳闸情况下故障点及跳闸产生的伴随节点与网络内任意节点的自阻抗与互阻抗。该方法同时考虑了虚拟节点与伴随节点对网络拓扑结构的影响。需要注意的是,伴随节点与原有故障线路两端节点有一定的关系,而基于故障点的虚拟节点则相对随机。该方法可以对任意线路故障时网络内任意节点的电压暂降幅值进行计算,对简单辐射状网络与复杂电力网络均适用。最后以 IEEE 14 节点标准系统为测试系统,将本文所提方法的计算结果与 PSCAD 仿真模型数据进行对比,验证了本文方法的有效性。

收稿日期:2013-11-29;修回日期:2014-06-12

1 电压暂降幅值计算模型

电网在正常运行和故障条件下的运行状态均可以用节点电压方程来描述[12],利用节点电压方程可以方便地计算故障情况下的节点电流和电压。对于给定拓扑结构的目标网络,根据网络参数形成节点导纳矩阵从而得到节点阻抗矩阵,可以方便地计算出各种故障条件下的节点故障电流和故障电压,这是电网故障分析中的一种重要方法。

1.1 系统带故障点的节点阻抗计算模型

由于电力系统中的输电线路距离较长,且大部分暴露在外,受自然环境及人为因素影响很大,系统中绝大部分故障发生在输电线路上,本文重点分析输电线路上的故障引起的电压暂降幅值计算。图 1 为一个 N 节点网络输电线路故障示意图,其中,节点 P 为 N 节点网络中任意选定的待分析节点。假设:故障发生在线路 i-j 上,h 为线路 i-j 上任意位置的故障点;Z_h 为故障过渡阻抗;l_{ih} 为线路端点 i 与故障点 h 之间线路的长度;l_{ij} 为故障点所在线路 i-j 的总长度。

故障点 h 的自阻抗以及 h 与待分析节点 P 之间的互阻抗[8]分别见式(1)、(2)。

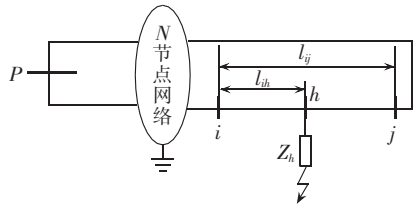

图 1 N 节点系统输电线路故障示意图

Fig.1 Power transmission line fault of N-node system

$$Z_{Ph}^{s}=(1-\xi)Z_{ih}^{s}+\xi Z_{hj}^{s} \tag{1}$$

$$Z_{hh}^{s}=(1-\xi)^{2}Z_{ii}^{s}+2\xi(1-\xi)Z_{ij}^{s}+\xi^{2}Z_{jj}^{s}+\xi(1-\xi)zl_{ij}^{s} \tag{2}$$

其中,s 取值 0、1、2 分别表示零序、正序与负序;Z_{Ph}^{s} 为待分析节点与故障点之间的互阻抗;Z_{ih}^{s}、Z_{hj}^{s}、Z_{ij}^{s} 分别为故障点与故障所在线路端点之间以及两端点之间的互阻抗;Z_{hh}^{s} 为故障点的自阻抗;Z_{ii}^{s}、Z_{jj}^{s} 分别为节点 i、j 的自阻抗;zl_{ij}^{s} 为故障线路 i-j 的阻抗;ξ 为故障位置参数,其可表示为式(3)。

$$\xi=l_{ih}/l_{ij} \tag{3}$$

从式(1)和式(2)不难看出,故障点 h 的自阻抗与互阻抗除了与线路本身的阻抗参数相关外,仅与故障位置参数 ξ 相关。

1.2　不同故障类型下电压暂降幅值计算模型

在同一故障位置发生不同类型故障时,节点的电压暂降幅值也各不相同,但均可以利用对称分量法进行分析。

以图 1 为例说明,当点 h 发生两相短路故障时,由于其属于不对称故障,故障后节点 P 的电压相量含三序分量,其计算公式如下:

$$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{A}}=\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})}-\frac{Z_{Ph}^{1}-Z_{Ph}^{2}}{Z_{hh}^{1}+Z_{hh}^{2}+2Z_{h}}\boldsymbol{U}_{h,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})} \tag{4}$$

$$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{B}}=\alpha^{2}\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})}-\frac{\alpha^{2}Z_{Ph}^{1}-\alpha Z_{Ph}^{2}}{Z_{hh}^{1}+Z_{hh}^{2}+2Z_{h}}\boldsymbol{U}_{h,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})} \tag{5}$$

$$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{C}}=\alpha\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})}-\frac{\alpha Z_{Ph}^{1}-\alpha^{2}Z_{Ph}^{2}}{Z_{hh}^{1}+Z_{hh}^{2}+2Z_{h}}\boldsymbol{U}_{h,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{A}}$、$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{B}}$、$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{C}}$ 分别为点 h 处发生两相短路故障时任意节点 P 的 A、B、C 三相电压相量;$\boldsymbol{U}_{P,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})}$、$\boldsymbol{U}_{h,\mathrm{A}}^{(\mathrm{ref})}$ 分别为故障前任意节点 P 和故障点 h 的 A 相电压相量;旋转因子 $\alpha=\mathrm{e}^{\mathrm{j}2\pi/3}$。

其他故障类型引起的电压暂降幅值计算模型可参见文献[13-14],本文不再赘述。

2　线路单端跳闸时电压暂降幅值计算模型

故障时电压暂降幅值计算方法一般均假设在故障过程中,故障线路两端的断路器不动作,即网络结构不发生变化。而在实际系统中,当输电线路发生故障时,特别是在故障持续时间稍长的情况下,系统中继电保护装置将动作,跳开故障所在线路的某一侧断路器,导致网络的拓扑结构变化。若故障仍未消除,此时电压暂降幅值将与上述假设中的暂降幅值不同,在此情况下需要从研究网络的拓扑结构变化入手,对第 1 节中故障电压计算表达式进行修正。

2.1　线路单端跳闸前后系统结构变化分析

图 2 反映了 N 节点系统中线路 i-j 发生故障时线路保护装置跳闸但故障仍未消除的全过程。

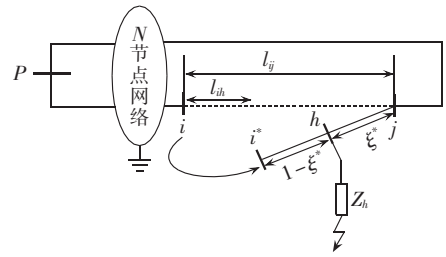

图 2 线路单端跳闸示意图

Fig.2 Schematic diagram of transmission line single-terminal trip

显然,由于保护装置的动作导致了系统网络结构发生了如下变化:

a. 故障发生时原有节点 i 在保护装置动作后产生了一个与之相对应的伴随节点 i^*,加上故障点 h,则此时的网络节点数由原有的 N 变成 $N+2$;

b. 故障点 h 的位置由线路 i-j 转移至线路 j-i^* 上,其在故障线路上的位置可用变量 ξ^* 表示,其与原有故障点 h 的位置参数的关系为 $\xi^*=1-\xi$。

2.2　节点阻抗矩阵变化分析

由于伴随节点 i^* 的出现,原有 N 节点网络变成了 $N+1$ 节点网络,此时需要考虑系统结构变化引起的节点间的自阻抗与互阻抗的变化,从而重新生成阻抗矩阵。一般采用导纳矩阵求逆的方法,即先根据电网连接和元件参数列出各个节点的自导纳和互导纳,然后对含有所有节点的导纳矩阵进行求逆运算,从而得到电网的节点阻抗矩阵。式(7)、(8)分别为伴随节点出现前、后的系统节点导纳矩阵。式(8)中实线框中的部分即是由于伴随节点的增加而增加的元素,除了新增加的一行一列以外,数值变化的只有故障线路两端点 i、j 之间的互导纳以及它们各自的自导纳(如式(8)中的虚线框中所示),且存在式(9)所示关系。

$$\boldsymbol{Y}=\begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1i} & \cdots & Y_{1j} & \cdots & Y_{1(N-1)} & Y_{1N} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2i} & \cdots & Y_{2j} & \cdots & Y_{2(N-1)} & Y_{2N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{i1} & Y_{i2} & \cdots & Y_{ii} & \cdots & Y_{ij} & \cdots & Y_{i(N-1)} & Y_{iN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{j1} & Y_{j2} & \cdots & Y_{ji} & \cdots & Y_{jj} & \cdots & Y_{j(N-1)} & Y_{jN} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ Y_{(N-1)1} & Y_{(N-1)2} & \cdots & Y_{(N-1)i} & \cdots & Y_{(N-1)j} & \cdots & Y_{(N-1)(N-1)} & Y_{(N-1)N} \\ Y_{N1} & Y_{N2} & \cdots & Y_{Ni} & \cdots & Y_{Nj} & \cdots & Y_{N(N-1)} & Y_{NN} \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$
\boldsymbol{Y}'=\begin{bmatrix}
Y'_{11} & Y'_{12} & \cdots & Y'_{1i} & \cdots & Y'_{1j} & \cdots & Y'_{1(N-1)} & Y'_{1N} & Y'_{1i^*} \\
Y'_{21} & Y'_{22} & \cdots & Y'_{2i} & \cdots & Y'_{2j} & \cdots & Y'_{2(N-1)} & Y'_{2N} & Y'_{2i^*} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\
Y'_{i1} & Y'_{i2} & \cdots & Y'_{ii} & \cdots & Y'_{ij} & \cdots & Y'_{i(N-1)} & Y'_{iN} & Y'_{ii^*} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\
Y'_{j1} & Y'_{j2} & \cdots & Y'_{ji} & \cdots & Y'_{jj} & \cdots & Y'_{j(N-1)} & Y'_{jN} & Y'_{ji^*} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots \\
Y'_{(N-1)1} & Y'_{(N-1)2} & \cdots & Y'_{(N-1)i} & \cdots & Y'_{(N-1)j} & \cdots & Y'_{(N-1)(N-1)} & Y'_{(N-1)N} & Y'_{(N-1)i^*} \\
Y'_{N1} & Y'_{N2} & \cdots & Y'_{Ni} & \cdots & Y'_{Nj} & \cdots & Y'_{N(N-1)} & Y'_{NN} & Y'_{Ni^*} \\
Y'_{i^*1} & Y'_{i^*2} & \cdots & Y'_{i^*i} & \cdots & Y'_{i^*j} & \cdots & Y'_{i^*(N-1)} & Y'_{i^*N} & Y'_{i^*i^*}
\end{bmatrix} \tag{8}
$$

$$
\begin{cases}
Y'_{ii}=Y_{ii}-1/(zl_{ij}) \\
Y'_{ij}=Y_{ij}+1/(zl_{ij}) \\
Y'_{jj}=Y_{jj}-1/(zl_{ij}) \\
Y'_{ji}=Y_{ji}+1/(zl_{ij})
\end{cases} \tag{9}
$$

由式(9)可见,故障线路端点的自导纳和互导纳的变化量均是故障线路 $i-j$ 之间的线路导纳,特别地,网络结构变化后节点 i 与 j 不相连,式(9)中的 Y'_{ij} 与 Y'_{ji} 都为 0。而新增的伴随节点的互导纳除了 $Y'_{i^*i^*}$、Y'_{ji^*}、Y'_{ij^*} 外,其他均为零元素。$Y'_{i^*i^*}$、Y'_{ji^*}、Y'_{i^*j} 可用式(10)求出。

$$
\begin{cases}
Y'_{i^*i^*}=1/(zl_{ij}) \\
Y'_{ji^*}=-1/(zl_{ij}) \\
Y'_{i^*j}=-1/(zl_{ij})
\end{cases} \tag{10}
$$

由式(10)可见,伴随节点 i^* 的自导纳等于故障线路导纳,而伴随节点 i^* 与端点 j 之间的互导纳等于故障线路导纳的负值。在求出新的节点导纳矩阵后,进行求逆运算即可以得到带伴随节点的节点阻抗矩阵。

在求出含有伴随节点的 $(N+1)\times(N+1)$ 维节点阻抗矩阵的基础上,考虑故障点 h 与系统中其他节点间的互阻抗和该点的自阻抗,最后得到式(11)所示的同时包含伴随节点 i^* 和故障点 h[8]的 $(N+2)\times(N+2)$ 维阻抗矩阵,其中,实线框中的部分为由于伴随节点的增加而增加的元素,虚线框中的部分为由于故障点 h 的出现而增加的元素。此时,故障点 h 的自阻抗以及 h 与任意节点 P 之间的互阻抗分别如式(12)、(13)所示。

$$
\boldsymbol{Z}'=\begin{bmatrix}
Z'_{11} & Z'_{12} & \cdots & Z'_{1i} & \cdots & Z'_{1j} & \cdots & Z'_{1(N-1)} & Z'_{1N} & Z'_{1i^*} & Z'_{1h} \\
Z'_{21} & Z'_{22} & \cdots & Z'_{2i} & \cdots & Z'_{2j} & \cdots & Z'_{2(N-1)} & Z'_{2N} & Z'_{2i^*} & Z'_{2h} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
Z'_{i1} & Z'_{i2} & \cdots & Z'_{ii} & \cdots & Z'_{ij} & \cdots & Z'_{i(N-1)} & Z'_{iN} & Z'_{ii^*} & Z'_{ih} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
Z'_{j1} & Z'_{j2} & \cdots & Z'_{ji} & \cdots & Z'_{jj} & \cdots & Z'_{j(N-1)} & Z'_{jN} & Z'_{ji^*} & Z'_{jh} \\
\vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\
Z'_{(N-1)1} & Z'_{(N-1)2} & \cdots & Z'_{(N-1)i} & \cdots & Z'_{(N-1)j} & \cdots & Z'_{(N-1)(N-1)} & Z'_{(N-1)N} & Z'_{(N-1)i^*} & Z'_{(N-1)h} \\
Z'_{N1} & Z'_{N2} & \cdots & Z'_{Ni} & \cdots & Z'_{Nj} & \cdots & Z'_{N(N-1)} & Z'_{NN} & Z'_{Ni^*} & Z'_{Nh} \\
Z'_{i^*1} & Z'_{i^*2} & \cdots & Z'_{i^*i} & \cdots & Z'_{i^*j} & \cdots & Z'_{i^*(N-1)} & Z'_{i^*N} & Z'_{i^*i^*} & Z'_{i^*h} \\
Z'_{h1} & Z'_{h2} & \cdots & Z'_{hi} & \cdots & Z'_{hj} & \cdots & Z'_{h(N-1)} & Z'_{hN} & Z'_{hi^*} & Z'_{hh}
\end{bmatrix} \tag{11}
$$

$$
Z'^{s}_{Ph}=\xi^* Z'^{s}_{i^*h}+(1-\xi^*)Z'^{s}_{hj} \tag{12}
$$

$$
Z'^{s}_{hh}=\xi^{*2}Z'^{s}_{i^*i^*}+2\xi^*(1-\xi^*)Z'^{s}_{i^*j}+(1-\xi^*)^2 Z'^{s}_{jj}+\xi^*(1-\xi^*)zl^{s}_{i^*j} \tag{13}
$$

2.3 电压暂降幅值计算过程

考虑保护装置单端跳闸且线路故障未切除情况下的电压暂降幅值计算过程如图 3 所示。

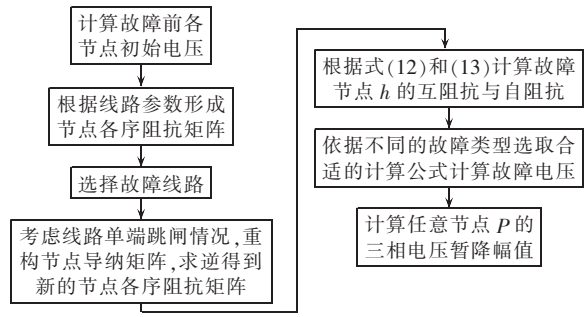

图 3 本文所提方法的计算流程

Fig.3 Flowchart of proposed calculation method

3 算例分析

利用本文所提方法对图 4 所示 IEEE 14 节点系统进行仿真计算,为了简化分析,假设本文中所提到的故障为金属性故障即故障过渡电阻 $Z_h=0$。IEEE14 节点系统包含 2 台发电机、3 台变压器、15 条线路,

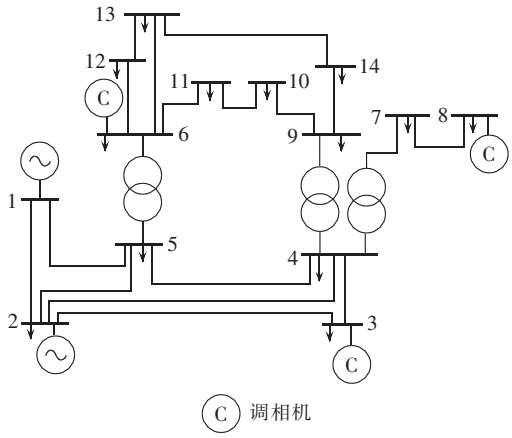

图 4 IEEE 14 节点系统

Fig.4 IEEE14-node system

其元件设备、线路详细参数见文献[15]。发电机正序、负序、零序阻抗分别采用 j0.30 Ω、j0.30 Ω、j0.05 Ω,变压器均为 YN,yn0 型联结方式。

本文计算了支路 2–3 分别发生三相短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路 4 种故障时,保护装置单端跳闸但故障未消除情况下节点 1、5、9、11、13 的暂降电压幅值。为了使计算结果更具有说服力,设置 4 种故障类型下的故障位置参数 ξ^* 分别为 0.2、0.4、0.6、0.8。同时在 PSCAD 仿真系统中搭建 IEEE 14 节点模型,模拟在保护装置单端跳闸但故障未切除情况下的这 4 种故障情况,将仿真所得数据与利用本文的计算方法所得数据进行对比分析,结果见表 1—4,表中电压暂降幅值均为标幺值。

从表 1—4 的数据可以看出,应用本文提出的计算方法,在各种不同故障类型与不同的故障位置参数条件下,所得的各节点电压暂降幅值与 PSCAD 仿真结果基本相等。表 1 中 4 个节点计算结果的最大误差分别为 0.063%、0.201%、0.054%、0.081%,进一步验证了本文所提计算方法在不同故障类型与不同故障位置条件下的适用性与准确性。

表 1 三相短路时节点电压暂降幅值计算和仿真结果

Tab.1 Calculated and simulative results of node voltage sag amplitude calculation for three-phase short circuit

节点	ξ^*	幅值(本文方法)			幅值(PSCAD 仿真)		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	0.2	0.8273	0.8273	0.8273	0.8272	0.8272	0.8272
5	0.2	0.7229	0.7229	0.7229	0.7228	0.7228	0.7228
9	0.2	0.7568	0.7568	0.7568	0.7567	0.7566	0.7566
11	0.2	0.7952	0.7952	0.7952	0.7947	0.7947	0.7947
13	0.2	0.8083	0.8083	0.8083	0.8083	0.8083	0.8082

表 2 单相接地短路时节点电压暂降幅值计算和仿真结果

Tab.2 Calculated and simulative results of node voltage sag amplitude calculation for single-phase grounding fault

节点	ξ^*	幅值(本文方法)			幅值(PSCAD 仿真)		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	0.4	0.9121	0.9864	0.9875	0.9120	0.9861	0.9876
5	0.4	0.8371	0.9551	0.9525	0.8370	0.9539	0.9534
9	0.4	0.8451	0.9459	0.9377	0.8453	0.9438	0.9389
11	0.4	0.8739	0.9545	0.9507	0.8738	0.9531	0.9511
13	0.4	0.8821	0.9524	0.9509	0.8822	0.9516	0.9513

表 3 两相短路时节点电压暂降幅值计算和仿真结果

Tab.3 Calculated and simulative results of node voltage sag amplitude calculation for two-phase short circuit

节点	ξ^*	幅值(本文方法)			幅值(PSCAD 仿真)		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	0.6	1.0100	0.9187	0.9136	1.0100	0.9187	1.0090
5	0.6	0.9831	0.8543	0.8471	0.9829	0.8541	0.8470
9	0.6	0.9640	0.8566	0.8595	0.9638	0.8563	0.8593
11	0.6	0.9732	0.8819	0.8817	0.9728	0.8814	0.8814
13	0.6	0.9714	0.8886	0.8863	0.9712	0.8885	0.8886

表 4 两相接地短路时节点电压暂降幅值计算和仿真结果

Tab.4 Calculated and simulative results of node voltage sag amplitude calculation for two-phase grounding fault

节点	ξ^*	幅值(本文方法)			幅值(PSCAD 仿真)		
		A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相
1	0.8	0.9823	0.9221	0.9188	0.9821	0.9220	0.9187
5	0.8	0.9474	0.8553	0.8527	0.9472	0.8555	0.8522
9	0.8	0.9373	0.8584	0.8619	0.9368	0.8591	0.8612
11	0.8	0.9527	0.8845	0.8851	0.9479	0.8845	0.8844
13	0.8	0.9478	0.8913	0.8903	0.9475	0.8915	0.8901

4 结论

本文重构了线路单端跳闸而故障未消除情况下系统的节点阻抗矩阵,分析计算了矩阵中新增加的与改变的元素,考虑故障电阻的影响分别计算了电网中任意线路上发生三相短路、单相接地短路、两相短路、两相接地短路 4 种故障情况下电网中任意节点的电压暂降幅值。在标准 IEEE 14 节点系统中通过本文计算方法所得结果与 PSCAD 仿真结果进行对比,验证了本文计算方法的准确性和有效性。

一般情况下网络拓扑结构变化时节点导纳矩阵需重新列写,本文考虑单端跳闸这一特殊情况,提出的方法只需修正与故障线路相关的矩阵元素,其物理概念明确,可以简化问题,加快计算速度,同时也为后续分析电网中继电保护装置及重合闸动作特性时系统各节点电压暂降状况提供了理论基础。

参考文献:

[1] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究[J]. 中国电机工程学报,2002,22(1):64-69.
XIAO Xiangning,XU Yonghai,LIU Lianguang. Research on mitigation methods of voltage sag with phase angle jump[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(1):64-69.

[2] BOLLEN M H J. Understanding power quality problems:voltage sags and interruptions[M]. New York,USA:IEEE Press,1999:129-156.

[3] 陈礼频,肖先勇,张文海. 考虑扰动源定位的电压暂降监测点最优配置[J]. 电力自动化设备,2014,34(2):79-90.
CHEN Lipin,XIAO Xianyong,ZHANG Wenhai. Optimal allocation of voltage-sag monitors considering disturbance-source locating [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(2):79-90.

[4] 杨达,肖先勇,汪颖,等. 计及失效事件和严重程度不确定性的设备电压暂降失效率评估[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):107-111,117.
YANG Da,XIAO Xianyong,WANG Ying,et al. Assessment of equipment invalidation due to voltage sags considering uncertainties of failure and severity[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):107-111,117.

[5] 雷刚,顾伟,袁晓东. 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. A voltage sag index considering compatibility between system and sensitive equipment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010,25(12):132-138.

[6] 郑天文,肖先勇,张文海,等. 考虑母线电压暂降非线性分布特征的配电网故障定位[J]. 电力自动化设备,2012,32(11):115-120.
ZHENG Tianwen,XIAO Xianyong,ZHANG Wenhai,et al. Fault location considering nonlinear profile of bus voltage sag for disribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012,32(11):115-120.

[7] 王宾,潘贞存,徐文远. 配电系统电压跌落幅值估算分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):29-34.
WANG Bin,PAN Zhencun,XU Wenyuan. Voltage sags profiles estimation for power distribution systems[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(13):29-34.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 陈礼频,肖先勇,汪颖,等. 考虑保护配合动作随机性的电压暂降频次评估[J]. 电网技术,2012,36(5):133-138.
CHEN Lipin,XIAO Xianyong,WANG Ying,et al. Assessment on voltage sag frequency considering randomness of protection cooperation[J]. Power System Technology,2012,36(5):133-138.

[11] 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.

[12] ELISA E J,ARACELI H. An analytical approach for stochastic assessment of balanced and unbalanced voltage sags in large system [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2006,21(3): 1493-1500.

[13] 王东旭. 基于虚拟节点的复杂电网电压跌落评估及其在故障定位中应用的研究[D]. 武汉:武汉大学,2012.
WANG Dongxu. Voltage dip assessment and its application in fault location method study in complex power grid based on virtual bus[D]. Wuhan:Wuhan University,2012.

[14] PARK C H,JANG G. Stochastic estimation of voltage sags in a large meshed network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007,22(3):1655-1664.

[15] IEEE. IEEE 14-bus test case[EB/OL]. (2013-10-15). http://www.ee.washington.edu/resea-rch/pstca/pf14/pg_tca14bus.htm.

作者简介:

兰 剑

兰 剑(1974-),男,湖北武汉人,博士研究生,研究方向为电网规划与可靠性分析(**E-mail**:lanj95598@163.com);

王东旭(1984-),男,湖北荆门人,博士,研究方向为电能质量以及配电网故障定位等(**E-mail**:felixnice@126.com);

叶 曦(1989-),男,湖北武汉人,博士研究生,研究方向为电能质量与风险分析(**E-mail**:leslit@whu.edu.cn);

刘开培(1962-),男,湖北荆门人,教授,博士,研究方向为电能质量分析与控制(**E-mail**:kpliu@whu.edu.cn)。

Calculation of voltage sag amplitude for single-terminal trip of faulty line

LAN Jian[1,2],WANG Dongxu[1,2],YE Xi[1],LIU Kaipei[1]

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;
2. Wuhan Electric Power Supply Company,State Grid Hubei Electric Power Company,Wuhan 430072,China)

Abstract: With the consideration of influence of relay protection on grid topology,a method of voltage sag amplitude calculation is proposed for the single-terminal trip of faulty line by relay protection while the fault is still exists. The influences of the virtual node produced by the line fault and the accompanied node produced by the single-terminal trip on the power grid topology are analyzed and the node admittance matrix and node impedance matrix are to reconstructed,based on which,the node voltage sag amplitudes are calculated. The node voltage sag amplitudes calculated by the proposed method for IEEE 14-node system are similar to those calculated by PSCAD simulation,verifying its validity.

Key words: relay protection; voltage sag; line fault; failure analysis; single-terminal trip; impedance matrix; models; calculations; electric network topology