

含分布式电源的配电网故障分析叠加法

王守相, 江兴月, 王成山

(天津大学电力系统仿真控制教育部重点实验室, 天津市 300072)

摘要:传统的配电网故障分析方法已不能满足未来分布式发电系统的需求。为此,文中针对含分布式电源的配电网故障分析展开研究。将常见分布式电源节点划分为PQ节点、PI节点、PV节点和PQ(V)节点几种类型,并根据各节点类型的特点,提出了在故障分析中的处理方法。根据含分布式电源的三相不平衡弱环配电网的特点,在前推回推类方法的基础上,提出了一种含分布式电源的配电网三相故障计算的叠加方法。该方法既能用于辐射型网络,也能用于弱环网络。采用13节点算例对所述方法进行了测试,算例结果证明了该算法的可行性和有效性。

关键词:分布式发电;配电网;故障分析;叠加法

中图分类号: TM711; TM727.2

0 引言

分布式电源由于具有高能源利用率、环境友好和能利用可再生能源等优点,在全球范围内越来越受到重视^[1-2]。

传统配电网故障计算^[3-12]通常采用对称分量法、相分量法以及对称分量与相分量相结合的方法。当配电系统的三相线路参数不对称和三相负荷不平衡问题较突出时,配电网短路故障分析宜采用相分量法。文献[8]把故障设备通过故障补偿电路与大地、电源和馈线支路构成了一个回路,使得故障计算和潮流计算具有完全相同的计算过程。但是这种方法没有提到对PV节点的处理,同时,在发生接地故障时,会出现接地节点的电压趋于0的情况,影响了这种方法的收敛性。文献[9]在文献[8]的基础上,利用前推回推算法和多端口补偿技巧,考虑回路节点、故障节点和PV节点等情况,实现了配电三相不平衡弱环网系统的短路分析。但是,这种方法没有提到对其他类型分布式电源节点的处理。文献[10]不形成电网节点复数导纳阵,而直接利用支路阻抗形成节点阻抗参数进行配电网的短路故障计算。

研究人员针对分布式电源对配电网各方面的影响,如对电压/无功优化控制、故障恢复计算、电能质量的影响等^[13-15]进行了研究。而针对含分布式电源的配电网故障计算的相关文献较少。本文针对含分

布式电源的配电网短路电流计算方法展开研究,提出了含分布式电源的三相不平衡配电网故障计算的改进前推回推算法。

1 故障计算中对分布式电源的分类和处理

根据燃料电池、微型燃气轮机等几种典型分布式电源与电网互联的接口方式及其运行和控制方式,可以将它们分别看做PQ节点、PV节点、PI节点和PQ(V)节点。例如:如果分布式电源经常运行在额定工况附近,则可将其看做PQ节点;对于用同步电机接入电网的分布式电源,当其励磁控制方式为功率因数控制时,则可看做PQ节点;储能系统可以看做PI节点;若用同步电机接入电网,当其励磁控制方式为电压控制时可看做PV节点,即将能够维持节点电压幅值的分布式电源节点看做PV节点;对于直接并网的异步风力发电机组,可以看成是PQ(V)节点。

1.1 对PQ节点的处理

对于视为PQ节点的分布式电源,其模型等同于恒定功率负荷模型,电流方向为注入母线方向。PQ节点的视在功率为: $S = -P \pm jQ$ 。若分布式电源同时向电网输送有功和无功,等式中Q前取负号;若分布式电源向电网输送有功,而从电网吸收无功,如感应风力发电机,则Q前取正号。

分布式电源对接入节点的注入电流为:

$$\dot{I}_{inj-PQ}^k = \left[\frac{S_{PQ}^*}{\dot{V}_{PQ}^k} \right]^* \tag{1}$$

式中: $\dot{V}_{PQ}^k$ 为第k次迭代得到的PQ型分布式电源接入节点的电压,其他类型分布式电源接入节点的变

收稿日期: 2007-10-09; 修回日期: 2008-01-03。
国家自然科学基金资助项目(50777047);教育部科学研究重大项目(306004);教育部新世纪优秀人才支持计划资助项目。

量具有相似的形式。

1.2 对 PV 节点的处理

PV 节点的有功功率 P 恒定,电压幅值 V 恒定。在计算中,如果 PV 节点的电压幅值不等于设定的电压幅值,则需要调节 PV 节点的无功功率。采用向 PV 节点注入一定电流的方法,使 PV 节点的电压幅值达到预先设定的值 V_{PV}^s 。为使 PV 节点的电压幅值达到该值,在 PV 节点上增加的无功功率 ΔQ_{PV}^k 以及该无功功率相应的等效注入电流 $\Delta \dot{I}_{inj_PV}^k$ 分别为:

$$\Delta Q_{PV}^k = \frac{|\dot{V}_{PV}^k| \Delta V_{PV}^k}{X} \quad (2)$$

$$\Delta \dot{I}_{inj_PV}^k = \left(\frac{-j \Delta Q_{PV}^k}{\dot{V}_{PV}^k} \right)^* = \frac{1}{X} \Delta V_{PV}^k \angle (90^\circ + \delta_{PV}^k) \quad (3)$$

式中: $\Delta V_{PV}^k = |\dot{V}_{PV}^k| - V_{PV}^s$; X 为 PV 节点到根节点的支路电抗之和。

因此, PV 节点的注入电流为:

$$\dot{I}_{inj_PV}^k = \dot{I}_{inj_PV}^{k-1} + \Delta \dot{I}_{inj_PV}^k \quad (4)$$

式中: $\dot{I}_{inj_PV}^k$ 为第 k 次迭代得到的 PV 节点处的总注入电流。

由于 PV 节点可调无功功率有限,所以需要判断在有附加注入电流情况下 PV 节点的无功功率是否越限。当 PV 节点的无功功率越限时,将 PV 节点转化为 PQ 节点。PV 节点处的无功功率 Q_{PV}^k 的计算公式为:

$$Q_{PV}^k = \text{Im}(\dot{V}_{PV}^k (\dot{I}_{inj_PV}^k)^*) + Q_{load}^k \quad (5)$$

式中: Q_{load}^k 为 PV 节点处第 k 次潮流迭代得到的负荷无功功率。

1.3 对 PI 节点的处理

PI 节点输出的有功和电流幅值恒定,分别为 P_{PI}^s 和 I_{PI}^s 。该类节点相应的无功功率可由迭代得到的电压、恒定的电流幅值及有功功率计算得出:

$$Q_{PI}^k = \sqrt{(I_{PI}^s)^2 |\dot{V}_{PI}^k|^2 - (P_{PI}^s)^2} \quad (6)$$

PI 节点的注入电流为:

$$\dot{I}_{inj_PI}^k = \left(\frac{-P_{PI}^s - jQ_{PI}^k}{\dot{V}_{PI}^k} \right)^* \quad (7)$$

1.4 对 PQ(V) 节点的处理

对于直接并网的风力发电机组,由于异步发电机在输出有功功率的同时还要从系统吸收一定的无功功率,吸收的无功功率与转差率 s 、节点电压 V 有

关;在风力发电机处安装的并联电容器组输出的无功也与节点电压幅值有关。对于这类节点可以采用 PQ(V) 模型进行处理^[16]。

在潮流计算和短路故障分析中,第 k 次迭代的 PQ(V) 节点的视在功率和注入电流分别为:

$$S_{PQV}^k = -P_{PQV}^s + j(Q_{PQV}^k - Q_{cap}^k) \quad (8)$$

$$\dot{I}_{inj_PQV}^k = \left(\frac{S_{PQV}^k}{\dot{V}_{PQV}^k} \right)^* \quad (9)$$

式中: Q_{PQV}^k 和 Q_{cap}^k 分别为第 k 次迭代时分布式电源吸收的无功功率和并联电容器组补偿的无功功率。

2 含分布式电源的配电网短路故障计算

2.1 短路故障计算的基本思路

当系统发生短路故障时,可以认为弱环配电网系统存在 2 种回路:一种是配电网内部的回路,称之为环网回路;另一种是由配电网的故障点通过故障补偿电路经过地、馈线根节点或分布式电源和馈线组成的回路,称之为故障回路。

对任何不对称故障,总可以在故障端口处将不对称故障电路从电力网络中分离^[8]。图 1 就是从电力网络中分离出的故障补偿电路的示意图。

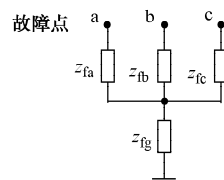


图 1 故障补偿电路示意

Fig. 1 Short circuit compensation circuit

由图 1 可以得到故障补偿电路的阻抗矩阵为:

$$\mathbf{Z}_f = \begin{bmatrix} z_{fg} + z_{fa} & z_{fg} & z_{fg} \\ z_{fg} & z_{fg} + z_{fb} & z_{fg} \\ z_{fg} & z_{fg} & z_{fg} + z_{fc} \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过对 z_{fa} , z_{fb} , z_{fc} , z_{fg} 的不同取值,可以模拟各种类型的金属短路和非金属短路故障。

当系统某处发生短路故障时,在故障节点处添加相应类型的故障补偿电路,故障回路由故障补偿电路通过地以及馈线根节点的电源或分布式电源与馈线构成了一个独立回路。故障回路阻抗由 2 部分构成,一部分为从故障节点向网络看进去的故障端口阻抗,另一部分为故障补偿电路阻抗。

若系统中既存在环网回路,又存在故障回路,可以把这 2 种回路统一起来处理,此时,网络的回路阻抗矩阵可写为:

$$\mathbf{Z}_{eq} = \begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{LL} & \mathbf{Z}_{LF} \\ \mathbf{Z}_{FL} & \mathbf{Z}_{FF} \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{Z}_{LL}$ 为网络中环路回路矩阵, 对于三相潮流计算, 其阶数为环路回路数的 3 倍; $\mathbf{Z}_{LF}$ 和 $\mathbf{Z}_{FL}$ 为环路回路与短路回路的互阻抗, 其值为环路回路与短路故障回路公共部分支路阻抗之和; $\mathbf{Z}_{FF}$ 为故障回路阻抗矩阵, 对于三相潮流计算, 其阶数为故障数的 3 倍。

显然, 该回路阻抗阵的定义与环网回路的回路阻抗阵一样, 回路阻抗阵的对角元素等于回路上所有支路阻抗的总和, 非对角元素为对应 2 个回路上公共支路阻抗的总和。

环路注入电流和故障端口注入电流的求取方法如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Z}_{LL} & \mathbf{Z}_{LF} \\ \mathbf{Z}_{FL} & \mathbf{Z}_{FF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{I}}_L^k \\ \Delta \dot{\mathbf{I}}_F^k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{U}}_L^k \\ \Delta \dot{\mathbf{U}}_F^k \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: $\Delta \dot{\mathbf{I}}_L^k$ 和 $\Delta \dot{\mathbf{I}}_F^k$ 分别为环网回路和故障回路的等效注入电流; $\Delta \dot{\mathbf{U}}_L^k$ 和 $\Delta \dot{\mathbf{U}}_F^k$ 分别为解环端口处的电压差和故障端口处的电压差, $\Delta \dot{\mathbf{U}}_L^k = \dot{\mathbf{U}}_{j1}^k - \dot{\mathbf{U}}_{j2}^k$, $\Delta \dot{\mathbf{U}}_F^k = \dot{\mathbf{U}}_{f1}^k - \dot{\mathbf{U}}_{f2}^k$; $\dot{\mathbf{U}}_{j1}^k$ 和 $\dot{\mathbf{U}}_{j2}^k$ 为解环点电压, 可通过潮流计算得到; $\dot{\mathbf{U}}_{f1}^k$ 和 $\dot{\mathbf{U}}_{f2}^k$ 为故障点处电压, $\dot{\mathbf{U}}_{f1}^k$ 可以通过潮流计算求出, $\dot{\mathbf{U}}_{f2}^k$ 的值为故障端口注入电流和故障补偿电路阻抗的乘积。

于是, 解环端口处的注入电流和故障端口处的注入电流分别为:

$$\dot{\mathbf{I}}_L^k = \dot{\mathbf{I}}_L^{k-1} + \Delta \dot{\mathbf{I}}_L^k \quad (13)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_F^k = \dot{\mathbf{I}}_F^{k-1} + \Delta \dot{\mathbf{I}}_F^k \quad (14)$$

2.2 故障计算流程

故障计算程序与潮流计算程序没有本质区别, 只是在计算回路阻抗阵时考虑了故障回路的影响, 因此, 故障计算只是一种特殊运行方式下的潮流计算。此外, 在短路故障的潮流计算中, 将恒功率负荷用恒导纳负荷代替:

$$y_{\text{load}} = \frac{S_{\text{load}}^*}{|V_{\text{load}}|^2} \quad (15)$$

在第 k 次潮流迭代中, 负荷节点注入电流为:

$$\dot{\mathbf{I}}_{\text{load}}^k = y_{\text{load}} \dot{\mathbf{V}}_{\text{load}}^k \quad (16)$$

对于含分布式电源的配电网, 当系统发生短路故障时, 异步发电机节点的电压可能不满足并网运行的条件, 在此情况下, 将异步发电机退出运行。异步发电机并网运行条件一般认为是异步发电机节点电压必须大于某一数值, 若此条件不满足, 则异步发电机退出运行。

下面给出含有 PQ , PV , PI , $PQ(V)$ 这 4 种类型分布式电源的辐射状配电网在故障情况下的短路电流计算步骤。

1) 求出故障回路的等值阻抗矩阵。

2) 初始化各节点电压幅值和相角。

3) 将恒功率负荷转化为恒阻抗负荷。

4) 计算各节点负荷功率的注入电流。

5) 在故障节点, 对 PQ , PV , PI 类型分布式电源的接入节点叠加注入电流, 当异步发电机组并网运行时, 叠加 $PQ(V)$ 类型分布式电源的注入电流。

6) 回推计算各支路的电流, 从最后一层支路开始向根节点推进计算各支路的电流。

7) 前推求解节点电压, 从根节点开始向最后一层推进, 修正各节点的电压。

8) 计算故障端口的电压差, 修正故障节点的注入电流。

9) 计算 PI 节点的注入无功功率, 若无功越界, 则把 PI 节点转化成 PQ 节点处理, 修正 PI 节点的注入电流。

10) 计算 PV 节点的注入无功功率, 若无功越界, 则把 PV 节点转化成 PQ 节点处理, 修正 PV 节点的注入电流。

11) 判断系统中各节点相邻 2 次迭代的电压差是否满足收敛条件, 故障端口、 PV 节点的电压差是否满足收敛条件, 若这几个条件要求同时满足, 则进行下一步计算, 否则, 转步骤 4。

12) 判断是否有因电压偏低导致异步发电机退网的情况发生, 若退网, 则转步骤 4; 否则, 判断 $PQ(V)$ 节点的电压是否仍然满足异步发电机的入网条件, 若满足, 则进行异步发电机的并网运算, 继续下一步计算; 若不满足, 则进行异步发电机退网运算, 转步骤 4。

13) 计算异步发电机的转差, 求出其吸收的无功功率, 判断异步发电机的功率因数是否满足要求, 若不满足, 则根据功率因数要求调整并联电容器组的投切, 转步骤 4; 若满足要求, 则结束计算, 并输出结果。

含多种分布式电源的弱环配电网发生短路故障时的故障程序与含多种分布式电源的辐射状配电网发生故障时的故障程序类似, 仅需对含多种分布式电源的辐射状配电网故障程序做以下小的修改:

1) 步骤 1 改为计算解环回路和故障回路的等值阻抗矩阵。

2) 步骤 5 中添加一步, 即在解环点处叠加解环节点注入电流。

3) 步骤 8 改为计算解环回路和故障回路电压差, 修正解环节点和故障节点的注入电流。

4) 步骤 11 改为判断系统中各节点相邻迭代的电压差是否满足收敛条件, 解环端口、故障端口、 PV 节点的电压差是否满足收敛条件, 若这几个条件要

求同时满足,则进行下一步的计算,否则,转步骤4。

3 算例分析

本文选用一个13节点的辐射状配电网作为测试系统,该系统的接线如附录A图A1所示。同时,基于该系统构造一个弱环配电网:用一个零阻抗支路把节点8和节点12连接起来,则系统变成含单一回路的弱环网络。按照同样的方法可以构造具有不同环路的弱环系统。

本文对含不同类型分布式电源的辐射状配电网以及所构造的弱环配电网进行了故障潮流计算,计算结果如表1和附录A表A1、表A2所示。

为方便对数据进行分析,设测试算例系统的基准功率为100 kVA,变压器高压侧基准电压为7.2 kV,变压器低压侧基准电压为2.4 kV。由基准功率和基准电压可以计算出系统的基准电流值,变压器高压侧的基准电流为8.019 2 A,变压器低压侧的基准电流为24.038 5 A。选取变压器低压侧的基准电流作为网络的基准电流。

表1为含多种类型分布式电源的弱环配电网短路故障计算结果。其中:PQ类型电源接在节点11,其有功输出为50 kW,无功输出为70 kvar;PV类型电源接在节点9,其有功输出为120 kW;PI类型电源接在节点10,其有功输出为100 kW,额定电流为70 A;PQ(V)类型电源接在节点5,其有功输出为150 kW,额定电压幅值为2.4 kV(退网条件为1.9 kV)。故障发生在节点13,故障类型为三相接地短路。故障潮流计算结果显示,异步发电机在故障情况下继续并网运行,功率因数为0.98。

表1 含多种类型分布式电源的弱环配电网三相短路计算结果

Table 1 Calculation results of weakly meshed distribution system with multiple types of distributed generations under three-phase short circuit

节点	电压幅值			电流幅值		
	a相	b相	c相	a相	b相	c相
1	1.000 00	1.000 00	1.000 00	22.74	20.42	19.22
2	0.979 70	0.984 39	0.984 59	22.74	20.42	19.22
3	0.894 73	0.881 01	0.897 35	64.38	65.37	57.48
4	0.727 76	0.726 41	0.735 24	49.99	53.58	47.79
5	0.863 02	0.863 94	0.871 67	20.78	17.16	15.34
6	0.727 24	0.723 25	0.732 42	0.90	1.01	2.48
7	0.572 85	0.574 52	0.581 25	46.29	52.13	45.48
8	0.711 76	0.714 62	0.723 34	44.67	49.65	44.40
9	0.999 26	0.999 26	0.999 26	43.19	45.32	42.04
10	0.731 12	0.728 06	0.735 95	1.02	1.68	1.24
11	0.287 12	0.286 88	0.290 50	85.08	97.28	85.74
12	0.711 76	0.714 62	0.723 34	41.46	46.95	42.12
13	0.000 00	0.000 00	0.000 00	85.29	97.33	85.69

由以上算例结果可以看出,分布式电源的接入对短路电流有影响,影响的程度与分布式电源的类型、运行和控制方式以及接入位置有关。一般来说,分布式电源的接入使得短路故障点处的短路电流比未接入分布式电源时要大,具体大小需由故障分析程序计算得出。

需要说明的是,本文方法对于复杂的多电源网络格状网络也是适用的,但是由于基于前推回推思想和采用补偿的方法,当电源点和环路很多时,收敛性能会有所下降。这是值得进一步研究的问题。

4 结语

分布式发电是目前的研究热点,接入分布式电源会对传统的配电网有一定影响。

本文主要研究了接入分布式电源以后分布式电源对短路电流的影响。采用前推回推和补偿法相结合的算法,计及配电网三相不对称和弱环特性,提出了含多种类型分布式电源的配电网三相短路故障计算方法。该算法利用对各种故障具有统一形式的故障补偿电路,使电网的故障计算和潮流计算具有统一的计算公式和相似的迭代步骤。算例分析证明本文采用的方法是有效和可行的。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] 梁有伟,胡志坚,陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述. 电网技术,2003,27(12):72-75.
LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system. Power System Technology, 2003, 27(12): 72-75.

[2] PUTTGEN H B, MACGREGOR P R, LAMBERT F C. Distributed generation: semantic hype or the dawn of a new era. IEEE Power and Energy Magazine, 2003, 1(1): 22-29.

[3] 姜彤,白雪峰,郭志忠,等. 基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法. 中国电机工程学报,2003,23(2):50-53.
JIANG Tong, BAI Xuefeng, GUO Zhizhong, et al. A new method of power system fault calculation based on symmetrical components. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 50-53.

[4] BERMAN A, XU W. Analysis of faulted power systems by phase coordinates. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(2): 587-595.

[5] KERSTING W H. Distribution system modeling and analysis. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 2002.

[6] HONG H W. Application of the two-step compensation method to line-out and line-end fault calculation. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 730-736.

[7] NING Wenyuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. A research on fault calculation and simulation for EMS//

Proceedings of International Conference on Electrical Engineering: Vol 1, Aug 12-15, 1996, Beijing, China: 975-979.

[8] 吴文传,张伯明. 三相不平衡配电网的潮流故障统一分析方法. 电力系统自动化,2002,26(20):50-54.

WU Wenchuan, ZHANG Boming. A uniform approach for power flow analysis and fault analysis of asymmetrical three-phase distribution system. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(20): 50-54.

[9] 彭书涛,廖培金,李琳,等. 多 PV 节点的不平衡配电网潮流故障分析方法. 继电器,2004,32(2):6-9.

PENG Shutao, LIAO Peijin, LI Lin, et al. An approach to power flow and fault analysis of unbalanced distribution system with multi-PV nodes. Relay, 2004, 32(2): 6-9.

[10] 曹国臣,宋家骅,柳焯. 66 kV 及以下电网短路计算的新方法. 中国电机工程学报,1997,17(3):207-210.

CAO Guochen, SONG Jiahua, LIU Zhuo. A new method to calculate short circuits in weakly meshed distribution and sub-transmission networks. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 207-210.

[11] CHEN T H, CHEN M S, LEE W J, et al. Distribution system short circuit analysis: a rigid approach. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 444-450.

[12] ZHANG X, SOUDI F, SHIRMPHAMMADI D, et al. A distribution short circuit analysis approach using hybrid compensation method. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(4): 2053-2059.

[13] 石嘉川,刘玉田. 计及分布式发电的配电网多目标电压优化控制. 电力系统自动化,2007,31(13):47-51.

SHI Jiachuan, LIU Yutian. Multi-objective voltage control in distribution networks with distributed generation. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 47-51.

[14] 江南,龚建荣,甘德强. 考虑谐波影响的分布式电源准入功率计算. 电力系统自动化,2007,31(3):19-23.

JIANG Nan, GONG Jianrong, GAN Deqiang. Computing the maximum penetrating level of distributed generators in distribution network by taking account of harmonic constraints. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 19-23.

[15] 卢志刚,董玉香. 含分布式电源的配电系统故障恢复策略. 电力系统自动化,2007,31(1):89-92.

LU Zhigang, DONG Yuxiang. Service restoration strategy for the distribution systems with DGs. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 89-92.

[16] 王守相,江兴月,王成山. 含风力发电机组的配电网潮流计算. 电网技术,2006,30(21):42-45,61.

WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan. Power flow analysis of distribution network containing wind power generators. Power System Technology, 2006, 30(21): 42-45, 61.

王守相(1973—),男,通信作者,博士,副教授,主要研究方向:配电系统分析、分布式发电系统分析与仿真、电力系统安全性与可靠性评估。E-mail: sxwang@tju.edu.cn

江兴月(1984—),女,硕士研究生,主要研究方向:分布式发电系统分析。

王成山(1962—),男,长江学者特聘教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统安全分析、城市电网规划、分布式发电系统分析与仿真。

A Superposition Method of Fault Analysis for Distribution Systems Containing Distributed Generations

WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan

(Key Laboratory of Power System Simulation and Control of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Traditional fault analysis of distribution networks cannot meet the requirement of distributed generation system (DGs). In order to solve this problem, different distributed generators are classified into four types: PQ node, PI node, PV node and PQ(V) node. According to the properties of four types of nodes, different methods are proposed to handle different types of nodes in fault calculation. Considering the asymmetric property of three-phase distribution networks with DGs, based on the forward and backward method, superposition principle with fault compensation circuit is used in fault analysis under an unified formula and similar iteration process as load flow calculation. The proposed approach can deal with both radial structure networks and weakly coupled circle networks. Test results of 13-node test system verified the feasibility and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50777047), the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education (No. 306004) and Program for New Century Excellent Talents in University.

Key words: distributed generation; distribution network; fault analysis; superposition method

附录 A

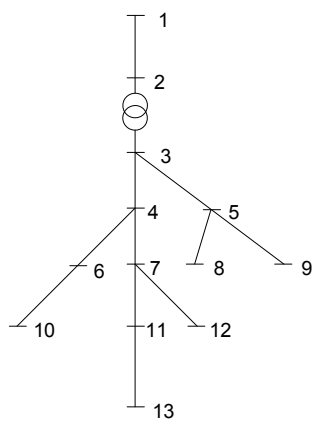


图 A1 13 节点系统接线图

Fig. A1 13-node test system

表 A1 中，PV 节点接在节点 10，其有功输出为 120kW。故障发生在节点 13，故障类型为 a 相接地短路。

表 A1 含 PV 节点的辐射状配电网 a 相接地短路故障计算结果

Table A1 Calculation results of radial distribution system with PV node under a-phase short circuit

节点	电压幅值			电流幅值		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
1	1.00000	1.00000	1.00000	9.00	6.97	13.30
2	0.99090	0.99819	0.99171	9.00	6.97	13.30
3	0.92791	0.98199	0.98812	42.92	18.43	26.71
4	0.76807	0.99825	0.99505	36.05	11.24	19.83
5	0.90563	0.96301	0.97457	7.04	7.46	7.57
6	0.88013	0.99249	0.99190	24.19	5.76	9.30
7	0.50969	1.02945	1.01372	51.59	9.22	12.56
8	0.89764	0.95352	0.97176	2.33	3.30	2.52
9	0.90554	0.95645	0.96903	0.78	1.66	2.52
10	0.99926	0.99926	0.99926	25.41	6.87	9.52
11	0.25653	1.08878	1.04844	48.69	3.90	5.56
12	0.50786	1.02289	1.00787	1.32	1.77	2.62
13	0.00000	1.16454	1.09199	48.51	2.02	2.84

表 A2 为含 PQ（V）类型分布式电源的辐射状配电网短路故障计算结果， PQ（V）类型电源接在节点 9，其各相有功输出为 150kW，额定电压幅值为 2.4kV（退网条件 1.9kV）；故障发生在节点 13，故障类型为三相接地短路。故障潮流结果显示，异步发电机在故障情况下继续运行，异步发电机的功率因数为 0.98。

表 A2 含 PQ(V)节点的辐射状配电网三相接地短路计算结果

Table A2 Calculation results of radial distribution system with PQ(V) node under three-phase short circuit

节点	电压幅值			电流幅值		
	a 相	b 相	c 相	a 相	b 相	c 相
1	1.00000	1.00000	1.00000	26.46	25.21	23.37
2	0.97592	0.97999	0.97955	26.46	25.21	23.37
3	0.85629	0.84355	0.85999	74.05	79.74	71.21
4	0.62434	0.62417	0.63105	69.05	75.30	67.24
5	0.83833	0.82896	0.84949	5.02	4.68	4.60
6	0.61590	0.61560	0.62171	3.19	3.19	4.30
7	0.41042	0.41285	0.41605	63.70	71.99	63.24
8	0.83088	0.82100	0.84699	2.16	2.84	2.20
9	0.84106	0.82432	0.84583	2.06	1.69	1.25
10	0.61116	0.61382	0.61789	1.59	1.06	1.61
11	0.20518	0.20572	0.20744	61.16	70.37	61.42
12	0.40727	0.41163	0.41351	1.06	0.71	1.07
13	0.00000	0.00000	0.00000	61.01	70.10	61.09