

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191123

## 基于端口补偿法的配网故障下主配网暂降分析

李鸿鑫<sup>1</sup>, 曾江<sup>2</sup>, 张华赢<sup>1</sup>, 艾精文<sup>1</sup>, 李艳<sup>1</sup>, 余涛<sup>2</sup>, 丘国斌<sup>2</sup>

(1. 深圳供电局有限公司电力科学研究院, 广东 深圳 518000; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** 针对目前配网短路故障计算仅考虑配网部分的变化而未能反映主配网耦合关系及变压器影响的问题, 提出一种基于端口补偿法的主配网暂降分析方法。根据配网拓扑和运行数据建立配网常态模型。并根据配网故障信息建立配网故障模型, 结合变压器三序模型计算配网在变压器高压侧母线处的等值。建立主网模型时将配网常态等值计入主网节点导纳阵中, 应用补偿法计算故障下的配网等值模型变化量对主网状态的影响。该影响值与故障前的网络状态量叠加后确定主网暂降状态, 进而确定配网暂降状态, 最终实现主配网暂降分析。通过对某城市电网系统进行仿真计算, 验证了所提算法的可行性和有效性。

**关键词:** 短路计算; 配网等值; 端口补偿法; 叠加; 主配网暂降分析

### Voltage sag analysis of a transmission and distribution network based on a compensation method under a distribution network fault

LI Hongxin<sup>1</sup>, ZENG Jiang<sup>2</sup>, ZHANG Huaying<sup>1</sup>, AI Jingwen<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, YU Tao<sup>2</sup>, QIU Guobin<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute, Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** There is a problem that the calculation of short-circuit faults in a distribution network only considers the distribution network, and neglects the influence of the transformer and the coupling relationship of transmission and the distribution network. This paper proposes a solution based on compensation. Based on the topology and operational data of a distribution network, a normal model is established. According to the type and location of a distribution network short circuit fault, the equivalence of a distribution network under short circuit fault is established. A three-sequence model of a transformer is used to establish the equivalence of the distribution network at the bus bar of the high voltage side of the transformer. Incorporating the equivalence of the distribution network's normal form into a node admittance matrix and combining with the variation of equivalence of distribution network before and after the fault occurs, the variation on the state of the transmission network is calculated using the compensation method. After the variation is superposed with the network state before the fault, the state of transmission and distribution network is determined successively, and finally voltage sag analysis of transmission and distribution network is completed. The feasibility and accuracy of the proposed algorithm are verified by simulating certain urban power systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777078) and Science and Technology Project of Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd. (No. SZKJXM20160169).

**Key words:** short circuit calculation; equivalence of distribution network; compensation method; superposition; voltage sag analysis of transmission and distribution network

## 0 引言

传统的短路下暂降分析一般单独在配网或者单

独在主网中展开<sup>[1-4]</sup>。许多学者<sup>[5-7]</sup>对主网短路故障时的暂降信息传递和变化进行了分析, 在主网短路建模时将配网等效为阻抗, 考虑了配网的功率特性, 能够反映故障下主网变化引起的配网吸收功率变化; 文献[8]分析了 PSASP 与 PSDE-SCCP 在分析主网短路时负荷模型类别不同的结果差异, 提出适用

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777078); 深圳供电局有限公司科技项目资助(SZKJXM20160169)

于实际电网短路仿真的负荷模型设置标准；文献[9]在主网短路基础上完成电力系统 ward 等值计算，可以应用于系统电磁暂态计算等场景。短路发生在主网的故障分析及其相关应用研究较为成熟。

单独分析配网短路时为了简化模型常常忽略配网故障对主网造成的影响<sup>[10-14]</sup>。文献[10]在进行配网暂降评估时将配网根节点视作平衡节点，文献[11-14]在进行故障区段定位及低压穿越研究时同样假定配网根节点的电压恒定不变。配网根节点的简化模型为方便快速分析配网暂降提供了基础支撑，但没有通过量化配网故障对主网电压及根节点的影响来判断该影响可否直接忽略，有可能导致分析失准，而分析偏差在暂降源离主配网边界较近时会较为明显。

配网与主网通过变压器相连，一般变压器低压侧母线被视为配网的根节点。变压器物理特性与线路不同，其对短路信息的传递特性也不可忽略。当短路发生时，短路电压和电流经过线路并不会发生较大的变化，但流经变压器时有可能会发生相位跳变或个别序分量中断传递等情况。而配网短路分析多是基于变压器低压侧电压恒定的前提进行的，因此需要改进配网短路模型。

如何保证在尽量减少计算速度下完成准确的主配网短路分析，就需要选择既能反映网络和负荷的物理特性、主配网间的耦合特性，又便于分解计算的模型。文献[15-17]中将节点负荷模型以恒定阻抗或导纳等效，基于电路方程求解配网潮流，较恒 PQ 模型更能体现负荷模型的电压静特性同时提高了计算速度。文献[18-20]在故障点接入三相支路模拟短路情况，通过设定支路具体参数可准确模拟不同故障类型，该模型具有良好的通用性和实用性。

不少学者成功将补偿法应用在短路故障计算中，实现了快速分析的目的<sup>[21-26]</sup>。文献[21-22]通过引入虚拟支路和虚拟节点，将故障后的参数不对称电网分解成无故障对称网络和模拟参数不对称及故障的网络两部分。文献[23-26]同样将短路网络分成正常网络分量和故障分量，单独求解二者后叠加完成短路计算。补偿法的原理是将网络变化等效为电源的变化进而通过叠加原理实现复杂场景下的网络分析，因而其能够快速准确地获得分析结果，而应用补偿法时重点在于如何将复杂状态下的网络分成线性叠加的两部分。

综上所述，本文用三相等效支路接入网络模拟发生短路故障的配网，应用串并联变换得到故障配网的等值模型，结合故障配网正常状态下的等值模

型得到该配网的变化量，以此作为补偿法应用的基础。通过使主网分析中的节点导纳矩阵包含配网的物理信息，进而应用补偿法量化配网发生故障时对主网电压产生的影响，结合叠加法得到主网电压分布，再根据变压器模型分析降压变压器的低压侧电压，最后确定故障配网状态，完成主配网的暂降分析。

## 1 配网模型

配网与主网通过输电线路和变电站连接起来，它们之间的物理连接关系决定了配网的网络结构变化时，主网的状态也会随之发生或大或小的改变。由于主网的电压和功率等级远高于配网，通常主网受到的影响很小；当配网变化较明显时，主网的变化响应不可忽略，电压变化是配网故障引起主网响应的体现。

选择主网为计算主体，先考虑配网故障时的等值变化，再分析其对主体的影响，是一种可行快捷的方法。本章对正常和故障状态下的配网等值进行分析，为主配网联合分析提供配网模型基础。

主、配网经由降压变压器(如图1所示)连接，主网接于变压器高压侧母线  $n$ ，配网接于低压侧母线  $v$ ，其中  $z_t$  是变压器等效模型的阻抗。配网的等值是以  $n$  为观测点望向用户侧的响应模型，等值准确性会直接影响故障分析的准确性。



图1 变压器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of transformer

由于恒定阻抗模型能反映功率随电压变化的特性，故在故障时采用恒阻抗模型比恒功率模型更加符合实际运行特性。

针对短路故障发生在配网的场景，为了更准确地反映负荷在故障下的变化特性，本章在配网负荷建模时采用恒阻抗模型，选择在故障点接入并联支路模拟短路，在此基础上计算配网在  $v$  端口的正常等值模型  $Z_v$  和故障等值  $Z_{vf}$ ；通过分析变压器对电压和电流的传递作用，进一步计算得到配网在  $n$  端口的等值模型  $Z_n$  和故障等值  $Z_{nf}$ 。

### 1.1 正常状态

配电网络由用电负荷与输电线路组成，由于配网的负荷信息和网络信息往往并不是三相严格对称，所以对应的模型  $Z_{line}$  和  $Z_{load}$  是三相形式，以反应各个相的物理特性。

$$\mathbf{Z}_{\text{load}} = \begin{bmatrix} Z_{\text{load}_a} & & \\ & Z_{\text{load}_b} & \\ & & Z_{\text{load}_c} \end{bmatrix} \quad (1)$$

配网接出的用户功率相间一般没有耦合关系, 所以负荷模型的非对角元为0; 其中负荷模型的元素  $Z_{\text{load}_a}$  通过配网实际的运行数据  $V_a$  和负荷数据  $P_a + jQ_a$  计算得到:

$$Z_{\text{load}_a} = \frac{|V_a|^2}{P_a - jQ_a} \quad (2)$$

$$\mathbf{Z}_{\text{line}} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} \end{bmatrix} \quad (3)$$

线路模型  $\mathbf{Z}_{\text{line}}$  中对角元  $Z_{aa}$ 、 $Z_{bb}$ 、 $Z_{cc}$  表示各相的自阻抗参数, 非对角元为互阻抗参数。

应用电路原理中的串并联变换处理配网模型, 从端口  $v$  往配网看就是一组接地的三相阻抗  $\mathbf{Z}_v$ 。

## 1.2 故障状态

短路点的物理特性可以用一个接地三相支路模拟, 如图2所示。

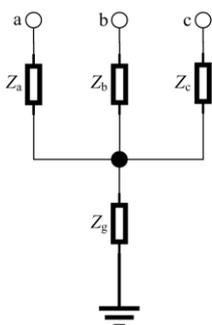


图2 故障模拟电路图

Fig. 2 Circuit diagram of fault simulation

不同形式的短路等效模型都可以用图2表示, 但是对应的参数不一样。当该点发生三相接地短路时,  $Z_a = Z_b = Z_c = Z_g = 0$ ; 当故障为单相(如a相)接地短路时,  $Z_a = Z_g = 0$ ,  $Z_b = Z_c = \infty$ ; 当故障为两相(如b、c两相)相间短路时,  $Z_b = Z_c = 0$ ,  $Z_a = Z_g = \infty$ ; 当故障为两相(如b、c两相)接地短路时,  $Z_b = Z_c = Z_g = 0$ ,  $Z_a = \infty$ 。

当短路故障发生在配网的节点时, 相当于在该节点接入一条支路  $z_f$ 。当短路故障发生在线路上时, 原线路被截成两条线路, 并在点  $f$  接入一条支路  $z_f$ , 同时节点数增加1。无论短路故障位置情况如何, 都可以求得故障状态的等值模型, 用  $z_{vf}$  表示。

## 1.3 变压器高压侧端口 $n$ 处的配网等值

变压器模型在三序电压、电流传播中有着不同的物理特性, 先利用配网在  $v$  端口处三相形式的等值模型经过相序变换可求得相应的三序形式。

对于变压器不同的绕组接法, 所对应的变压器零序等值电路也有所不同。当变压器有任意侧为Y型不接地接法时, 零序网络从该侧断开悬空; 当变压器两侧均为Y型接地接法时, 且绕组接法使得两侧相位不产生移相时, 可当作普通线路处理; 由于YNd型接法的变压器同时存在相位变化与序网端点悬空情况, 特对此分析说明, 分析方法具有通用性。

对于YNd型变压器, 其高低压端点间的正序、负序及零序等效电路图如图3所示。

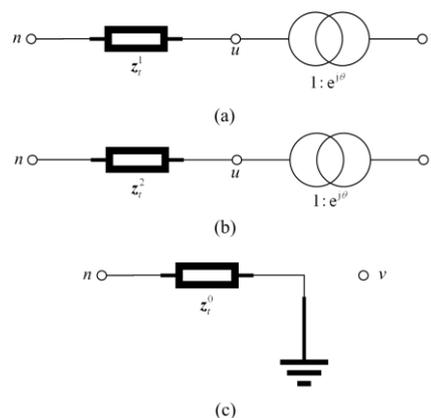


图3 YNd型变压器等值三序电路图

Fig. 3 Equivalent triple sequence circuit diagram of YNd type transformer

其中  $z_t^0$ 、 $z_t^1$  和  $z_t^2$  分别为变压器等效模型中阻抗的三序分量, 配网侧  $v$  节点接入处满足式(4)。

$$\mathbf{U}_v^{0,1,2} = \mathbf{Z}_v^{0,1,2} \cdot \mathbf{I}_v^{0,1,2} \quad (4)$$

其中:  $\mathbf{U}_v^{0,1,2}$  为  $v$  端口的电压;  $\mathbf{I}_v^{0,1,2}$  为从  $v$  端口流入配网的电流;  $\mathbf{Z}_v^{0,1,2}$  为配网在  $v$  端口的正常等值模型; 上标 0、1、2 表示对应物理量为包含零序、正序和负序分量的矩阵形式, 相应的阻抗和导纳物理量为方阵, 电流、电压物理量为列向量(下同)。

YNd接法中, 变压器两端间没有零序的通路, 配网的零序电流不会流入主网中, 所以  $u$ 、 $v$  端点间的物理关系中零序分量与正负序分量无耦合, 同时从主网接入节点  $n$  看零序与正负序分量也没有耦合关系。

对于图2(c)中的零序网络易得

$$\mathbf{U}_n^0 = \mathbf{Z}_n^0 \cdot \mathbf{I}_n^0 \quad (5)$$

其中:  $\mathbf{Z}_n^0 = z_t^0$ ;  $\mathbf{U}_n^0$  为  $n$  端口的电压;  $\mathbf{I}_n^0$  为主网流

入  $n$  端口的电流。

对于图 2(a)、图 2(b)，对于配网接入点  $v$  有  $I_v^0 = 0$ ，可只取正、负序网络有：

$$U_v^{1,2} = Z_v^{1,2} \cdot I_v^{1,2} \quad (6)$$

其中， $Z_v^{1,2}$  为矩阵  $Z_v^{0,1,2}$  中的对应分块阵。根据变压器的原理可描述  $u$ 、 $v$  端点间关系如下：

$$\begin{bmatrix} U_u^1 \\ U_u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\theta} & \\ & e^{j\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_v^1 \\ U_v^2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} I_u^1 \\ I_u^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e^{-j\theta} & \\ & e^{j\theta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_v^1 \\ I_v^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

分别记作  $U_u^{1,2} = S_U \cdot U_v^{1,2}$ ， $I_u^{1,2} = S_I \cdot I_v^{1,2}$ ，由于  $I_u^{1,2} = I_n^{1,2}$ ，可写作  $I_n^{1,2} = S_I \cdot I_v^{1,2}$ ，其中  $S_I = (S_U^{-1})^*$ 。

由此进一步得到

$$U_u^{1,2} = Z_u^{1,2} \cdot I_u^{1,2} \quad (9)$$

其中， $Z_u^{1,2} = S_U \cdot Z_v^{1,2} \cdot (S_I)^{-1}$ 。

$u$ 、 $v$  端点间的物理关系描述为

$$U_n^{1,2} = Z_n^{1,2} \cdot I_u^{1,2} \quad (10)$$

其中， $Z_{nu}^{1,2} = \begin{bmatrix} z_t^1 \\ z_t^2 \end{bmatrix}$ ， $Z_n^{1,2} = Z_{nu}^{1,2} + Z_u^{1,2}$ 。

综上，从主网接入点  $n$  观察配网的等值模型为

$$Z_n^{0,1,2} = \begin{bmatrix} Z_n^0 & \\ & Z_n^{1,2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

或者将其表示为导纳形式为

$$y_n^{0,1,2} = (Z_n^{0,1,2})^{-1} \quad (12)$$

## 2 主配网暂降分析

本节结合配网故障前后的等值模型对主网进行分析，应用补偿法计算出配网故障时对主网边界点注入电流的增加量，结合已生成的节点阻抗矩阵计算主网电压的变化量，通过叠加法得到此时的主网电压分布。

### 2.1 端口补偿法

当电力系统中发生故障或者网络拓扑变化时，总可以在故障端口或拓扑变化端口处将变化部分与原来部分分离开来。通过分离成原网络分量与修正网络分量，以修正分量来模拟该变化对原网络的影响，因此只需计算修正分量使得电压分布产生的变化量，结合叠加法可以完成网络求解。

### 2.2 主网分析

补偿法应用的原理是把网络变化的部分等效为外部电流源(或电压源)的变化从而保留原网络结构，因此需要尽量避免具体场景下除分离部分的其

余外部源的变化以减小计算量。本文在主网建模时，将所有配网的等值归入主网的网络模型中，保证了除故障配网因素外没有其他外部源的变化。

主网的导纳阵  $Y_s$  包含所有配网原来正常状态的信息，即节点导纳矩阵对角线元阵  $Y_{ii}$  中包含  $i$  点所对应配网的等值参数  $y_i$ ；相应地设  $Z_s$  为电力系统的节点阻抗矩阵，且  $Z_s = Y_s^{-1}$ 。

通过配网的正常状态与故障状态建模得到配网两个状态下的等值模型，现分别建立电力系统对应两种状态的模型，图 4 为正常状态下的系统示意图(其中  $y_m$  和  $y_n$  表示配网等值模型被纳入主网模型中)。

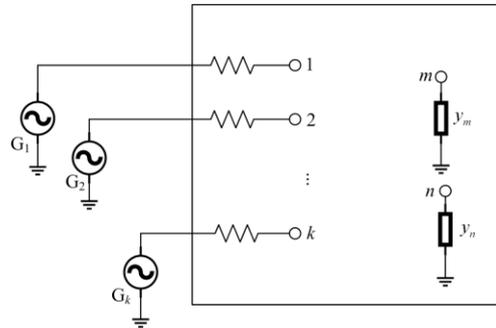


图 4 正常状态下电力系统网络

Fig. 4 Power system network under normal condition

故障时，节点  $n$  处配网的等效导纳由  $y_n$  变为  $y_{nf}$ ，应用补偿法将故障状态下的网络分离成原正常状态下网络和因故障而产生的修正分量，如图 5 所示。

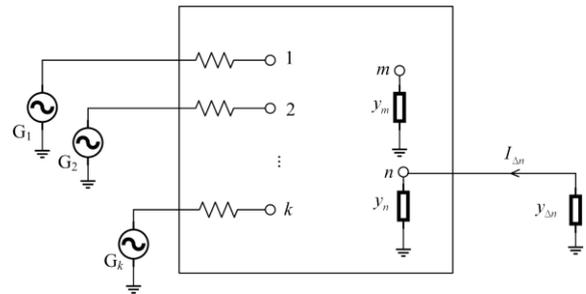


图 5 故障下的网络

Fig. 5 Fault network

其中  $y_{\Delta n}$  是  $3 \times 3$  的方阵，表示故障后等值模型相对于正常时的变化量； $I_{\Delta n}$  是  $3 \times 1$  的列向量，表示由于配网故障而产生的对  $n$  节点的注入电流增加量。

$$y_{\Delta n} = y_{nf} - y_n \quad (13)$$

由叠加定理和替代定理，可以将上述网络进一

步分解成正常网络与补偿网络之间的叠加, 图 6 为其叠加形式的示意图。

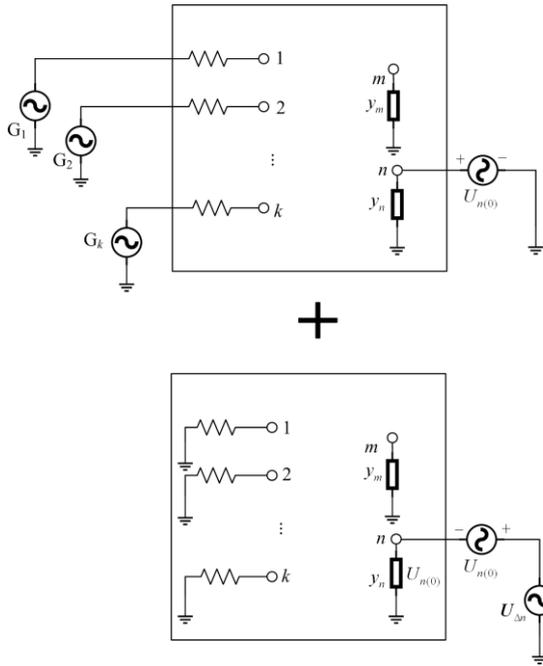


图 6 故障网络的叠加形式

Fig. 6 Superimposed form of fault network

图中  $U_{\Delta n} = -(\mathbf{y}_{\Delta n})^{-1} \cdot \mathbf{I}_{\Delta n}$ 。由此只需对补偿网络进行求解, 并结合原来正常网络的潮流情况, 即可得到配网短路时对主网的影响。

由于主网线路具有三相对称的特点, 采用序分量形式表示和求解主网状态相较于相分量形式更能降低计算难度和耗时, 先将配网等值变化量  $\mathbf{y}_{\Delta n}$  作相序变换。

$$\mathbf{y}_{\Delta n}^{0,1,2} = \mathbf{S}^{-1} \mathbf{y}_{\Delta n}^{a,b,c} \mathbf{S} \quad (14)$$

式中: 方阵  $\mathbf{y}_{\Delta n}^{0,1,2}$  和  $\mathbf{y}_{\Delta n}^{a,b,c}$  分别是方阵  $\mathbf{y}_{\Delta n}$  的序分量形式和相分量形式;  $\mathbf{S}$  为对称分量变换矩阵。根据节点阻抗矩阵的物理意义, 可知依据主网节点阻抗矩阵元素  $\mathbf{Z}_{mn}$  可以表示出节点  $n$  电压的故障分量。

$$\Delta \mathbf{U}_n^{0,1,2} = -\mathbf{Z}_{mn}^{0,1,2} \mathbf{I}_{\Delta n}^{0,1,2} \quad (15)$$

式中:  $\mathbf{I}_{\Delta n}^{0,1,2}$  为配网  $n$  故障分量的电流三序列向量;  $\Delta \mathbf{U}_n^{0,1,2}$  为故障分量网络  $n$  处的电压三序列向量。

修正分量网络中, 有

$$\Delta \mathbf{U}_n^{0,1,2} = -\mathbf{U}_{n(0)}^{0,1,2} + (\mathbf{y}_{\Delta n}^{0,1,2})^{-1} \mathbf{I}_{\Delta n}^{0,1,2} \quad (16)$$

式中,  $\mathbf{U}_{n(0)}^{0,1,2}$  为正常运行时节点  $n$  处的电压。

由以上两式得:

$$\mathbf{U}_n^{0,1,2} = (\mathbf{Z}_{mn}^{0,1,2} \mathbf{y}_{\Delta n}^{0,1,2} + \mathbf{I})^{-1} \mathbf{U}_{n(0)}^{0,1,2} \quad (17)$$

$$\mathbf{I}_{\Delta n}^{0,1,2} = \mathbf{y}_{\Delta n}^{0,1,2} (\mathbf{Z}_{mn}^{0,1,2} \mathbf{y}_{\Delta n}^{0,1,2} + \mathbf{I})^{-1} \mathbf{U}_{n(0)}^{0,1,2} \quad (18)$$

其中  $\mathbf{I}$  为  $3 \times 3$  的单位阵, 此处得到主网节点  $n$  处的电压  $\mathbf{U}_n^{0,1,2}$ , 计算该电压值与正常状态时的  $\mathbf{U}_{n(0)}^{0,1,2}$  的偏差, 根据偏差大小可决定是否需要重新计算主网所有节点的电压。如偏差较大, 可以通过式(19)推算任意节点  $m$  处的电压三序。

$$\begin{bmatrix} U_m^0 \\ U_m^1 \\ U_m^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ U_{m(0)} \\ 0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{mm}^0 I_{\Delta n}^0 \\ Z_{mm}^1 I_{\Delta n}^1 \\ Z_{mm}^2 I_{\Delta n}^2 \end{bmatrix} \quad (19)$$

## 2.3 配网分析

主网分析步骤确定了主网节点的电压  $\mathbf{V}_n^{0,1,2}$ , 则易得  $\mathbf{I}_{nf}^{0,1,2} = \mathbf{y}_{nf}^{0,1,2} \cdot \mathbf{V}_n^{0,1,2}$ , 结合  $\mathbf{I}_{vf}^{1,2} = \mathbf{S}_1^{-1} \cdot \mathbf{I}_{nf}^{1,2}$ 、 $\mathbf{I}_v^0 = 0$  和式(4)可以确定  $v$  端点处电流  $\mathbf{I}_v$  及电压  $\mathbf{U}_v$ , 结合电路原理即可完成配网故障下的状态计算。

## 2.4 算法流程

- 1) 读取配网基础数据, 建立配网负荷与线路模型, 并求解其等值模型  $\mathbf{y}_n$ 。
- 2) 读取或设定故障信息, 根据故障类型和故障位置修改配网模型, 求出故障下的配网等值  $\mathbf{y}_{nf}$ 。
- 3) 读取主网基础数据, 形成包含配网等值的导纳矩阵  $\mathbf{Y}_s$ , 求解主网各节点的初始电压  $\mathbf{U}_{i(0)}$ 。
- 4) 计算配网因故障引起的等值变化  $\mathbf{y}_{\Delta n}$ , 并进行相序变换得到序分量形式的  $\mathbf{y}_{\Delta n}$ 。
- 5) 利用电路的叠加定理, 计算配网等值变化量  $\mathbf{y}_{\Delta n}$  对主网的注入电流  $\mathbf{I}_{\Delta n}$ , 并计算由该电流产生的电压分量  $\Delta \mathbf{U}_i$ 。
- 6) 根据式(19), 令故障分量网络中的电压  $\Delta \mathbf{U}_i$  与初始电压  $\mathbf{U}_{i(0)}$  进行叠加, 得到配网故障下的主网电压分布。
- 7) 结合边界点的电压, 应用电路原理求解配网故障状态, 完成主配网暂降分析。

## 3 实例仿真与分析

### 3.1 实例模型

本文选择某城市电网(如图 7 所示)作为仿真对象, 该城市电网的主网中包含 4 座 500 kV 变电站(编号为 A~D)和 25 座 220 kV 变电站(编号 No.1~No.25)。

选择在该城市电网中 110 kV 的 NK 站下 10 kV 母线所接的 RX 线上作故障模拟(110 kV 的 NK 站经由输电线接于主网 No.13 站点的 ML\_110 母线, ML\_110 和 ML\_10 分别是 No.13 站点经三绕组变压

器接出的 110 kV 侧母线及 10 kV 侧母线), 图 8 为该馈线的拓扑图。



图 7 某城市电网主网拓扑

Fig. 7 Transmission network topology of urban power grid

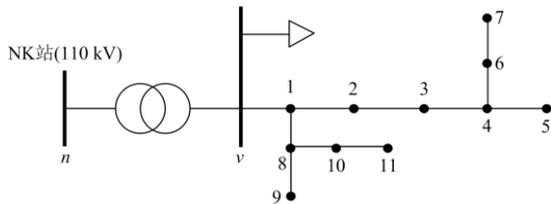


图 8 RX 馈线拓扑

Fig. 8 Figure of distribution feeder RX

为了简化表达, 下文以 No.1~ No.25 表示主网的 220 kV 站点, 以数字 1~11 表示配网 RX 线的节点。

### 3.2 结果分析

在 RX 线中分别选取三条线路上的点依次进行四种短路故障模拟, 部分模拟结果在表 1 中列出。

表 1 显示配网馈线 RX 线在不同位置发生短路故障时, 主网接入点  $n$  受到影响程度随距离增大而减弱。在线路  $v-1$  线路 5% 处发生两相接地、相间短路及三相短路故障时主网接入点电压  $U_n$  变化较明显(对应数据已加粗并下划), 幅值降至 0.7 左右, 同时配网接出点  $v$  的电压严重偏离正常值。

#### 1) 主网电压分析

根据式(19)可以计算出主网各个节点的电压, 由于篇幅限制此处只列出场景 2 和场景 4 下主网部分节点电压, 示于表 2。

从表 2 中可以发现, No.13 站的接出母线(ML\_110 和 ML\_10.5)都发生了暂降深度接近的电压暂降, 但 No.13 站及其他 220 kV 站点并未发生电压暂降。当故障发生在配网馈线靠近 10 kV 母线位置时, 虽然主网受到的影响较小, 但会使得其所在的 110 kV 站点及其上游的 220 kV 站点下的 110 kV 及 10 kV 接出母线发生电压暂降, 致使它们下接的馈线同样发生暂降。

表 1 主配网接入端  $n$ 、 $v$  的电压结果

Table 1 Voltage of node  $n$  and  $v$

故障位置	故障类型	场景序号	节点	$U_a/p.u.$	$U_b/p.u.$	$U_c/p.u.$
v-1 线路 5%处	A-N	1	$n$	1.003	0.988	1.000
			$v$	0.028	1.649	1.740
	BC	2	$n$	0.918	0.970	<b><u>0.753</u></b>
			$v$	1.010	0.788	0.259
	BC-N	3	$n$	0.918	0.970	<b><u>0.753</u></b>
			$v$	1.497	0.324	0.322
	ABC-N	4	$n$	<b><u>0.753</u></b>	<b><u>0.753</u></b>	<b><u>0.753</u></b>
			$v$	0.373	0.373	0.373
v-1 中点	A-N	5	$n$	1.003	0.991	1.000
			$v$	0.223	1.498	1.567
	BC	6	$n$	0.968	1.017	0.971
			$v$	1.010	1.046	0.853
	BC-N	7	$n$	0.968	1.016	0.971
			$v$	1.485	0.820	0.818
	ABC-N	8	$n$	0.971	0.971	0.971
			$v$	0.946	0.946	0.946
6-7 中点	A-N	9	$n$	1.001	0.997	1.000
			$v$	0.716	1.159	1.171
	BC	10	$n$	0.996	1.003	0.998
			$v$	<b><u>1.009</u></b>	<b><u>1.017</u></b>	<b><u>0.967</u></b>
	BC-N	11	$n$	0.996	1.002	0.998
			$v$	1.401	0.861	0.875
	ABC-N	12	$n$	0.998	0.998	0.998
			$v$	<b><u>0.995</u></b>	<b><u>0.997</u></b>	<b><u>0.995</u></b>
10-11 中点	A-N	13	$n$	1.002	0.994	1.000
			$v$	0.478	1.314	1.353
	BC	14	$n$	0.990	1.007	0.993
			$v$	<b><u>1.008</u></b>	<b><u>1.025</u></b>	<b><u>0.947</u></b>
	BC-N	15	$n$	0.990	1.006	0.993
			$v$	1.456	0.854	0.859
	ABC-N	16	$n$	0.993	0.993	0.993
			$v$	<b><u>0.988</u></b>	<b><u>0.988</u></b>	<b><u>0.988</u></b>

表 2 场景 2 及场景 4 下部分主网节点电压

Table 2 Voltage of part of transmission network nodes under Scene No.2 and No.4

故障场景	站点	$U_a/p.u.$	$U_b/p.u.$	$U_c/p.u.$
2	ML_110	0.933	0.986	<b><u>0.773</u></b>
	ML_10.5	0.938	0.990	<b><u>0.777</u></b>
	No.13	0.989	0.990	0.961
	No.14	0.991	0.992	0.965
	B	0.999	0.999	0.999
	No.20	0.999	1.000	0.999
4	ML_110	<b><u>0.773</u></b>	<b><u>0.773</u></b>	<b><u>0.773</u></b>
	ML_10.5	<b><u>0.777</u></b>	<b><u>0.777</u></b>	<b><u>0.777</u></b>
	No.13	0.958	0.958	0.958
	No.14	0.964	0.964	0.964
	B	0.999	0.999	0.999
	No.20	0.999	1.000	0.999

## 2) 故障配网电压分析

分别应用本文算法以及将  $U_v$  的三相分量都设为恒定值 1 p.u.的方法对不同故障类型下的配网进行短路计算。

① 场景 1、3 的故障类型为不对称接地故障,且故障点在配网接入点  $v$  近端,主网响应作用明显,本文算法中的  $U_v$  的非故障相电压与线电压相近,配网中各节点二者偏差最大达到 70%。场景 5、7、9、11、13 和场景 15 同样为不对称接地故障类型,此时本文算法下的  $U_v$  中存在非零的零序分量和负序分量,因此配网馈线的根节点电压不对称,反映了不对称故障下非故障相电压的特性。

下面将远端故障的场景 11 下二者的计算结果示于图 9(其中  $U_{a_0}$  与  $U_{b_0}$  为将  $U_v$  三相设为恒定值 1 p.u.的电压结果)。

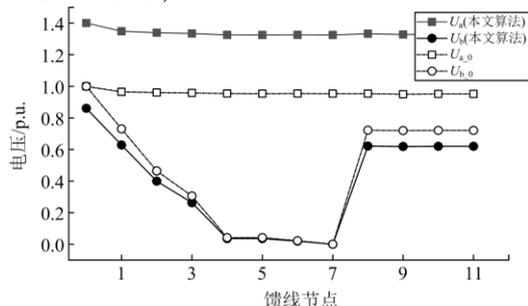


图 9 场景 11 下两种算法结果

Fig. 9 Comparison of the results of two methods under Scene No.11

将二者计算结果偏差以表格形式列出于表 3。

场景 11 的故障点位于馈线的末端,从图中可以看出两种算法在该场景下的计算结果偏差较大,二者故障相的电压结果偏差最大达到 0.139 5 p.u.,非故障相电压偏差则达到 0.400 7 p.u.。

由于 10 kV 母线电压恒定的算法忽略主网和变压器对配网非对称性接地故障的响应作用造成了分析误差,该误差在远端非对称性接地故障时依旧明显,不可忽略。

表 3 场景 11 下两种算法下的结果偏差

Table 3 Result deviation of two algorithms under Scene No.11

节点	$\Delta U_a/\text{p.u.}$	$\Delta U_b/\text{p.u.}$	$\Delta U_c/\text{p.u.}$
v	0.400 7	0.139 5	0.124 8
1	0.383 8	0.101 9	0.091 0
3	0.376 2	0.042 7	0.038 1
5	0.371 4	0.005 9	0.005 2
7	0.371 0	0.000 0	0.000 0
9	0.377 8	0.100 4	0.089 6
11	0.378 5	0.100 6	0.089 8

② 场景 2、6、10 和场景 14 的故障类型都为相间故障,表 4 列出了四种场景下  $U_v$  的三序分量;其中场景 2 的故障点在 10 kV 母线近端,此时本文算法下  $U_v$  的负序分量较大,随着故障点与 10 kV 母线距离的增加,该负序分量逐渐变小。因此两种算法在场景 2 下  $U_v$  的偏差较大不可忽略,在场景 6、10 和 14 下  $U_v$  的偏差较小。

表 4 相间故障下  $U_v$  的三序分量

Table 4 Sequence component of  $U_v$  under phase-to-phase fault

场景	$U_{v_0}$	$U_{v_1}$	$U_{v_2}$
2	(0.011,0)	(0.594,0.153)	(0.272,0.343)
6	(0.011,-0)	(0.884,0.389)	(-0.017,0.107)
10	(0.015,-0.008)	(0.871,0.484)	(-0.005,0.0126)
14	(0.012,-0.005)	(0.878,0.463)	(-0.011,0.033)

因此本文算法和 10 kV 母线电压恒定的算法比较,二者在发生近端的相间故障时结果偏差较为明显,在中远端相间故障时二者结果偏差较小。

③ 场景 4、8、12 和场景 16 都是三相接地短路故障,而三相接地故障下配网模型近似三相对称,因此电压中零序分量和负序分量近似为零。将两种算法在四种场景下的分布电压的偏差值示于表 5。

表 5 三相接地故障下两种算法的结果偏差

Table 5 Result deviation of two algorithms under three-phase line-to-ground fault

节点	场景 4	场景 8	场景 12	场景 16
v	0.627 1	0.054 3	0.005 0	0.012 1
1	0.000 0	0.000 0	0.003 7	0.004 4
3	0.000 0	0.000 0	0.001 5	0.004 3
5	0.000 0	0.000 0	0.000 2	0.004 3
7	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.004 3
9	0.000 0	0.000 0	0.003 6	0.001 6
11	0.000 0	0.000 0	0.003 6	0.000 0

由于两种算法下的配网馈线在端点  $v$  至用户处的模型相同且为近似三相对称,在同样的故障位置下配网馈线的各节点电压与根节点  $v$  的电压正相关且近似成线性相关。

由于场景 4 和场景 8 为在根节点所连支路上短路接地,除根节点外其余节点电压为 0(相应的偏差也为 0)。同时由于场景 8 的故障位置与 10 kV 母线的距离较场景 4 更远,此时场景 8 下两种算法下的  $U_v$  偏差仅为 0.054 3 p.u.,在故障点位置更远的场景 12 和 16 中,两种算法的结果偏差最大仅为 0.012 1 p.u.,此时结果偏差在误差容忍范围内。

## 3) 分析总结

以上分析表明本文算法相较于将  $U_v$  设为恒定

值 1 p.u.的方法更能体现实际配网不同类型故障下的实际特性。在非对称性接地故障时二者计算偏差较大,不可忽略该特性;在近端的相间短路和三相接地短路下,二者在配网根节点的电压偏差较大,其余故障场景下二者在故障配网的计算结果偏差在 0.03 p.u.以内。

同时两种算法下的 10 kV 母线电压  $U_V$  会直接影响同接于该母线下的其余馈线的电压分布,同理本文算法得到的上游 220 kV 站的接出母线(ML\_110 和 ML\_10.5)电压可以用于量化配网故障对配网电压分布的影响。

#### 4 结语

本文根据具体的故障场景建立配网故障模型,考虑主配网间的变压器作用,应用补偿法计算主网电压,进而应用电路分析法计算配网电压。该方法考虑了配网故障时主网及降压变压器的状态变化,同时端口补偿法的应用节省了大量的计算步骤。

基于所建立的主配网模型,可实现配网故障下的主网电压计算、故障配网计算,同时可以进一步进行非故障配网所受影响量化以及主配网的暂降评估,具有较广泛的应用前景。

#### 参考文献

- [1] 何梓田. 深圳电网电压暂降分析[D]. 广州: 华南理工大学, 2014.
- [2] 吴少臣. 城市电网电压暂降概率分析与风险评估[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [3] LAGACE P J, DESSAINT L A, LAVOIE M, et al. Transient short circuit current calculation using decoupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(3): 1110-1114.
- [4] CASTRO L M, GUILLEN D, TRILLAUD F. On short-circuit current calculations including superconducting fault current limiters (ScFCLs)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2513-2523.
- [5] MOON J, YUN S, KIM J. Quantitative evaluation of the impact of repetitive voltage sags on low-voltage loads[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2395-2400.
- [6] 付元欢. 电网故障下双馈感应发电机暂态特性解析与短路计算模型[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [7] KANIEWSKI J, FEDYCZAK Z, BENYSEK G. AC voltage sag/swell compensator based on three-phase hybrid transformer with buck-boost matrix-reactance chopper[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 3835-3846.
- [8] 章勇高, 李小蓓, 方华亮, 等. PSASP 与 PSDE-SCCP 短路计算的对比分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(11): 61-70.
- [9] ZHANG Yonggao, LI Xiaobei, FANG Hualiang, et al. Comparative analysis and study of the short-circuit calculation based on PSASP and PSDE-SCCP[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(11): 61-70.
- [9] 许海, 杨尚瑾, 金雪芬, 等. 基于潮流及短路计算的电力系统 Ward 等值实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(24): 104-110.
- [9] XU Hai, YANG Shangjin, JIN Xuefen, et al. A method to implement Ward equivalent based on power flow calculation and short circuit calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(24): 104-110.
- [10] 曾江, 丘国斌, 黄艺英. 基于等效算法和解析式拟合的快速配网暂降评估[J]. 电测与仪表, 2020, 57(9): 26-32.
- [10] ZENG Jiang, QIU Guobin, HUANG Yiying. Fast voltage sag assessment of distribution network based on equivalent algorithm and analytical fitting[J]. Electrical Measurement & Instrumentation 2020, 57(9): 26-32.
- [11] 卫志农, 何桦, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
- [11] WEI Zhinong, HE Hua, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [12] ALWASH S F, RAMACHANDARAMURTHY V K, MITHULANANTHAN N. Fault-location scheme for power distribution system with distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1187-1195.
- [13] 戴志辉, 李川, 焦彦军. IIDG 低压穿越模型及其在配网故障分析中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(7): 16-23.
- [13] DAI Zhihui, LI Chuan, JIAO Yanjun. Low-voltage ride through model of inverter-interfaced distributed generator and its application to fault analysis of distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(7): 16-23.
- [14] 杨杉, 同向前. 含低电压穿越型分布式电源配电网的短路电流计算方法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 93-99, 151.
- [14] YANG Shan, TONG Xiangqian. Short-circuit current of distribution network containing distributed generators with capability of low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 93-99, 151.
- [15] AHMADI H, JOSÉ R. Distribution system optimization based on a linear power-flow formulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(1): 23-33.
- [16] 李程. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究与软件开发[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.

- [17] 王成山, 孙晓倩. 含分布式电源配电网短路计算的改进方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 54-58.  
WANG Chengshan, SUN Xiaoqian. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 54-58.
- [18] 初壮, 张建强, 蔡国伟. 基于回路电流与负荷节点电压方程的配电网潮流计算[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 170-176.  
CHU Zhuang, ZHANG Jianqiang, CAI Guowei. Computing power flow of distribution networks based on loop currents and load node voltages[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 170-176.
- [19] GOSWAMI S K, BASU S K. Direct solution of distribution systems[J]. IEEE Proceedings of Generation Transmission & Distribution (Part C), 1991, 138(1): 78-88.
- [20] TENG J H. A direct approach for distribution system load flow solutions[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 882-887.
- [21] 刘国栋, 徐丙垠, 彭克, 等. 配电网短路电流计算端口补偿法的改进[J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2018, 32(1): 15-20.  
LIU Guodong, XU Bingyin, PENG Ke, et al. Improvement of port compensation method for short circuit current calculation in distribution network[J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2018, 32(1): 15-20.
- [22] 杨杉, 同向前, 刘健, 等. 含分布式电源配电网的短路电流计算方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1977-1982.  
YANG Shan, TONG Xiangqian, LIU Jian, et al. Short-circuit current calculation of distribution network with distributed generation[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1977-1982.
- [23] 王成山, 孙晓倩. 含分布式电源配电网短路计算的改进方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 54-58.  
WANG Chengshan, SUN Xiaoqian. An improved short circuit calculation method for distribution network with distributed generations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 54-58.
- [24] 蒋建东, 魏臻珠, 王晓华. 参数不对称电网故障计算的虚拟端口法[J]. 电工技术学报, 2010, 25(12): 161-166.  
JIANG Jiandong, WEI Zhenzhu, WANG Xiaohua. Fictitious port method for parameter unbalance power system fault calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 161-166.
- [25] 但扬清, 刘文颖, 朱艳伟, 等. 基于补偿法的快速短路电流算法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(14): 103-106.  
DAN Yangqing, LIU Wenyong, ZHU Yanwei, et al. A fast algorithm of short-circuit current based on compensation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(14): 103-106.
- [26] 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.

收稿日期: 2019-09-16; 修回日期: 2020-02-27

作者简介:

李鸿鑫(1986—), 男, 通信作者, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定; E-mail: lihongxin0308@163.com

曾江(1972—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电能质量分析与控制; E-mail: 78271793@qq.com

张华赢(1981—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电能质量监测、分析与治理领域科研工作。E-mail: 863707289@qq.com

(编辑 魏小丽)