

# 多 PV 节点的不平衡配电网潮流故障分析方法

彭书涛, 廖培金, 李琳, 王光明

(西安交通大学电力工程系, 陕西 西安 710049)

摘要: 根据配电网具有辐射状、弱环网和三相不平衡的特点, 在已有前代回推的基础上, 结合多端口混合补偿技术, 实现了三相潮流和非接地故障计算的统一。且将接地故障进行单独处理, 这样就避免了一般潮流和故障统一计算中由于接地点电压为零引起的计算不收敛现象。同时针对配电网中存在一个或者多个 PV 节点的情况, 提出了对 PV 节点进行补偿的方法。

关键词: 配电网; 补偿技术; PV 节点

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)02-0006-04

## 0 引言

潮流故障计算是电网的一项基本计算, 可靠的潮流故障计算方法必须精确、稳定、实用。对于配电网而言, 由于其自身的特点, 比如一般都是以辐射状或弱环网的方式运行, 三相负荷和电气参数都存在不平衡的现象, 支路参数  $R$  和  $X$  相差不大等, 因此也就对配电网的潮流故障计算方法提出了特殊的要求。首先收敛性问题在配电网潮流计算中备受重视, 例如由于支路参数  $R$  与  $X$  比值比较大, 使得原来在输电网中行之有效的算法, 如快速解耦法, 在配电网中不再有效; 其次在故障计算中由于三相不对称元件和负荷的存在使得潮流故障计算也不能采用一相计算的方法, 而必须进行三相潮流故障计算。在三相潮流故障计算中根据处理三相的方式的不同可以分为相分量法和序分量法。而由于配电网自身的特点使得在不平衡配电网系统的潮流故障计算中应用相分量法效果较好<sup>[1,2]</sup>。

目前针对配电网的潮流故障计算主要是利用前代回推和多端口补偿技巧<sup>[3~6]</sup>。文献<sup>[3]</sup>已经指出了这种方法的优点, 但是也有一定的不足之处<sup>[6]</sup>。文献<sup>[5]</sup>针对配电网的电网为辐射状的特点, 在前代回推潮流算法的基础上采用了叠加原理计算故障电流。该方法在处理纯辐射状电网时具有很高的计算效率, 但该文没有给出环网情况下的计算方法, 同时给出的计算公式是针对平衡配电网系统的。文献<sup>[6]</sup>采用一种系统化的方法, 解决了配电网三相不平衡弱环网系统的潮流和故障统一分析的问题, 具有较好的收敛性和较高的计算精度。但是这种方法没有提到如何对配电网中存在的 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在迭代中趋于零的情况, 从而使节点的注入电流趋于无穷大, 影响了这种方法的收敛性。

针对以上的问题, 在参阅了大量中外文献的基础上, 本文给出了一种解决配电网中存在的 PV 节点的方法, 提出了按故障是否接地进行分别处理的方法, 解决了潮流故障统一计算中存在的问题。从算例结果上看收敛性, 计算速度, 计算精度都可以达到要求。

## 1 规范的故障端口补偿电路模型

文献<sup>[7]</sup>指出对任何不对称故障总可以在故障点处将不对称故障从电力网络中分离开来, 图 3 就是从电力网络中分离出的故障补偿电路的示意图。

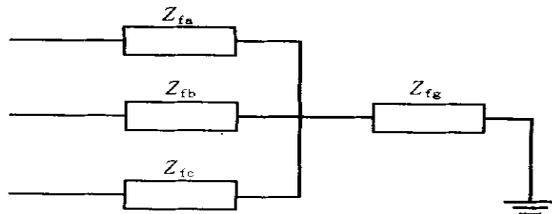


图 1 故障补偿电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of fault compensation circuit

图 1 中故障补偿电路的阻抗阵为:

$$Z_{cf} = \begin{bmatrix} Z_{fg} + Z_{fa} & Z_{fg} & Z_{fg} \\ Z_{fg} & Z_{fg} + Z_{fb} & Z_{fg} \\ Z_{fg} & Z_{fg} & Z_{fg} + Z_{fc} \end{bmatrix}$$

这样就可以通过选择  $Z_{fg}$ ,  $Z_{fa}$ ,  $Z_{fb}$ ,  $Z_{fc}$  的值来模拟不同的故障。几种典型性故障形式下  $Z_{fg}$ ,  $Z_{fa}$ ,  $Z_{fb}$ ,  $Z_{fc}$  的取值如表 1 所示。

表 1 几种典型故障形式模拟

Tab.1 Simulation of different types of fault

| 故障形式  | 阻抗取值/ $Z$ |          |          |          |
|-------|-----------|----------|----------|----------|
|       | $Z_{fa}$  | $Z_{fb}$ | $Z_{fc}$ | $Z_{fg}$ |
| ALG   | 0         | $10^6$   | $10^6$   | 0        |
| BCLL  | $10^6$    | 0        | 0        | $10^6$   |
| BCLG  | $10^6$    | 0        | 0        | 0        |
| ABCLL | 0         | 0        | 0        | $10^6$   |
| ABCLG | 0         | 0        | 0        | 0        |

其中 ALG 表示 A 相单相接地;BCLL 表示 BC 相间短路;BCLG 表示 BC 相间接地;ABCLL 表示三相短路;ABCLG 表示三相接地。

## 2 弱环网的潮流故障计算

对于弱环网而言,进行潮流故障计算前要先将撕裂各个环网,形成辐射状,对节点进行编号,对支路进行分层。对节点编号时先将根节点选出,默认根节点编号为 1,编号原则是:假设某一步需要对  $m$  个节点进行编号,那么这  $m$  个节点的新顺序是根据它们所连的下一级节点的个数所定。当某些节点所连的下一级节点的个数相同时,这些节点的新顺序按照它们原来的顺序所定。这里以图 2 来说明节点编号的方法。假设 1 号节点已经完成编号,由图可见,和 1 号节点相连的是 2、3、4 号节点,现在就是要对它们进行重新编号。可以看到 2、3、4 号节点所连的下一级节点的个数分别是 1、2、3,那么 2、3、4 号节点在新顺序下的编号是 2、3、4(这里新顺序和原顺序一样是因为图 2 是已经按照编号原则完成的网络图)。完成了对 2、3、4 号的节点编号后就可以按照同样的方法完成图 2 中所有节点的编号。对支路分层是在节点编号完成后,按照支路两端节点的大小对支路进行排序,按照小节点优先的原则进行支路的编号和分层。图 2 就是一个完成了的新网络图(这里只标出了节点的编号)。

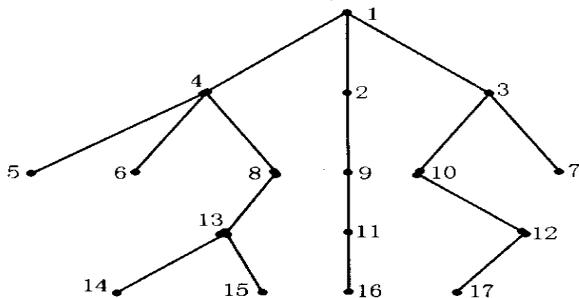


图 2 辐射网节点编号示意图

Fig.2 Schematic diagram of numbered nodes of RDN

### 2.1 辐射网潮流计算

首先用根节点电压的幅值和相角将网络中各节点电压的幅值和相角初始化。迭代法解辐射网潮流的算法每一步迭代包括 4 个步骤,在第  $k$  步迭代时:

(a) 节点注入电流计算。从根节点开始逐层计算每个节点的注入电流:

$$I_i^k = (S_i / V_i^{k-1})^* - Y_i^* V_i^{k-1} \quad (1)$$

在这里,  $I_i$  是由节点  $i$  三相注入电流组成的列向量;  $V_i$  是由节点  $i$  三相电压组成的列向量;  $S_i$  是节点  $i$  三相注入功率组成的列向量;  $Y_i$  是节点  $i$  所有接地支路的导纳和。

(b) 回推支路电流。从每条馈线的末端向馈线的根节点回推,计算每一条支路的电流,支路  $l$  的电流计算公式为:

$$J_l^k = -I_i^k + \sum_{m \in M} J_m^k \quad (2)$$

在这里  $J_l$  是由  $l$  支路的三相电流组成的列向量。  $M$  表示所有和节点  $i$  相连但除了支路  $l$  的支路。

(c) 前代运算。从根节点开始向馈线的末端逐层更新节点电压。在节点  $i$  电压已知的情况下,假设节点  $j$  通过支路  $l$  与节点  $i$  相连,则节点  $j$  电压的计算公式为:

$$V_j^k = V_i^k - Z_l J_l^k \quad (3)$$

$$\text{这里 } Z_l = \begin{bmatrix} Z_{aa,l} & Z_{ab,l} & Z_{ac,l} \\ Z_{ba,l} & Z_{bb,l} & Z_{bc,l} \\ Z_{ca,l} & Z_{cb,l} & Z_{cc,l} \end{bmatrix} \text{ 是支路 } l \text{ 的三相}$$

模型。

(d) 重复上面 (a) ~ (c),直到每个节点的电压在连续的两次迭代中的电压修正量小于某一个阈值。

上面的 (1) ~ (3) 提供了解决辐射网三相潮流的公式,但其中没有考虑环网和故障的作用。

### 2.2 环网回路和故障回路的补偿

#### 2.2.1 环网回路和非接地故障统一计算

当系统中同时存在着环网回路和非接地故障点时,此时系统中存在着两种回路,一种是电力网中的环网回路;另一种是故障补偿电路、地线、馈线根节点电源和馈线构成的故障回路,如图 3 所示。

图 3 中 L、F 代表环网和故障回路;  $j_1, j_2$  是环网撕裂产生的节点;  $f_1$  是系统中的某一个节点,  $f_2$  是在发生非接地故障时才出现的。显然可以将环网回路和非接地故障回路看成是两个端口,端口注入电流可以按照公式 (4) 计算:

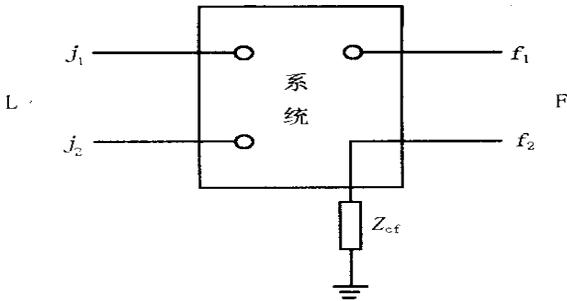


图3 环网回路和非接地故障回路的混合

Fig. 3 Merging of loop ports and ungrounding short circuit ports

$$\begin{bmatrix} Z_{LL} & Z_{LF} \\ Z_{RL} & Z_{RF} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_L \\ I_F \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_L \\ V_F \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中,  $Z_{LL}$  是 L 的端口阻抗阵,  $Z_{RF}$  是 F 的端口阻抗阵,  $Z_{LF}$  是 L, F 之间的互阻抗, 对于三相计算而言, 它们都是  $3 \times 3$  的矩阵。求解这些矩阵的方法可参见文献<sup>[6,7]</sup>, 这里不再赘述。 $I_L$ 、 $I_F$  是等效注入电流。 $V_L = [V_{j1} - V_{j2}]^T$ ,  $V_{j1}$ 、 $V_{j2}$  都可以通过辐射网潮流计算求得。 $V_F = [V_{f1} - V_{f2}]^T$ ,  $V_{f1}$  在辐射网潮流计算中求得,  $V_{f2}$  由下式计算:

$$V_{f2} = Z_{cf} I_F \quad (5)$$

### 2.2.2 接地故障的计算

接地故障的计算是基于叠加原理的。将接地故障看作是在正常运行条件下, 故障点处突然叠加一附加的注入电流, 再经过一次前代回推计算就可以计算出各个节点的电压和支路电流。这个附加电流由下式计算:

$$Z_{gf} I_{gf} = V_{gf} \quad (6)$$

其中  $I_{gf}$  就是附加的注入电流。在这里  $Z_{gf}$  仍然可称为端口阻抗阵, 它的求解方法和前面求解端口阻抗阵的方法并没有区别, 并没有象别的文献中所述的那样, 由于故障类型的不同  $Z_{gf}$  也不同。这是因为本文形成的  $Z_{gf}$  中已经暗含了对故障类型的区分。 $V_{gf} = [V_{fa} \ V_{fb} \ V_{fc}]^T$ , 几种典型故障下的取值如表 1 所示。如果同时存在多个故障, 只要将  $Z_{gf}$ 、 $V_{gf}$  相应地扩展即可, 并没有增加程序的复杂性。 $V_{a|0}$ ,  $V_{b|0}$ ,  $V_{c|0}$  是故障前故障点处的电压。

表2 典型接地故障时  $V_{gf}$  的取值Tab. 2 Values of  $V_{gf}$  under typical grounding fault

|        | $V_{fa}$   | $V_{fb}$   | $V_{fc}$   |
|--------|------------|------------|------------|
| A 相接地  | $-V_{a 0}$ | 0          | 0          |
| BC 接地  | 0          | $-V_{b 0}$ | $-V_{c 0}$ |
| ABC 接地 | $-V_{a 0}$ | $-V_{b 0}$ | $-V_{c 0}$ |

### 3 对 PV 节点的补偿

配电网中的 PV 节点是指那些在配电网中可以通过调节无功功率来维持电压幅值保持一定水平的节点, 如配电网中存在的无功补偿节点。对这种节点的处理方法是: 在弱环网潮流故障计算已经收敛的情况下, 如果得到的 PV 节点的电压幅值不等于设定的电压幅值, 就需要在 PV 节点注入一定大小的等效注入电流, 它可使 PV 节点的电压幅值达到预先设定的值。

为了求得等效注入电流, 首先要求出 PV 节点的电压不平衡量。在三相潮流故障计算中是要计及三相等效注入电流的, 但是对于 PV 节点来讲, 给定的往往是电压的预定幅值, 同时也没有对三相进行区分, 所以这里计算 PV 节点的电压不平衡量时只考虑一相, 计算公式为:

$$V_V = |V^s| - |V^k| \quad (7)$$

其中  $V_V$  是 PV 节点的电压不平衡列向量, 维数等于 PV 节点的个数,  $V^s$  是 PV 节点电压幅值的设定值,  $V^k$  是通过潮流故障计算得到的电压幅值。

其次, 就是要求出等效注入电流。在这里引入了 PV 节点灵敏度矩阵  $Z_V$  来计算等效注入电流, 计算公式为:

$$Z_V I_q = V_V \quad (8)$$

其中  $Z_V$  是一个常实数矩阵。它的对角元素  $Z_{ii}$  是从节点  $i$  到根节点所连的所有支路的正序电抗之和。当 PV 节点  $i, j$  到根节点没有共同支路的时候,  $Z_V$  中的非对角元素  $Z_{ij}$  为零; 否则  $Z_{ij}$  等于节点  $i, j$  到根节点形成的两道路的公共部分的支路的正序电抗之和。在这里  $I_q$  是等效注入电流的线性近似值。实际的注入电流可以用式 (9) 来计算:

$$\begin{aligned} I_{qa} &= |I_q| e^{j(90^\circ + \varphi_a)} \\ I_{qb} &= |I_q| e^{j(90^\circ + \varphi_b)} \\ I_{qc} &= |I_q| e^{j(90^\circ + \varphi_c)} \end{aligned} \quad (9)$$

这里  $\varphi_a$ ,  $\varphi_b$ ,  $\varphi_c$  是 PV 节点三相电压的相角。

在上面计算等效注入电流的时候没有考虑无功受限的情况。而在一般情况下, 由于 PV 节点可调无功功率并不是没有限制的, 所以需要计算在有附加注入电流情况下的无功功率, 要求这个无功功率不能越限。计算公式为:

$$Q_V = \text{Im}(V_i I_{in}^*) + Q_I \quad (10)$$

其中  $Q_l$  是负荷的注入无功功率,  $V_i = \begin{bmatrix} V_{ia} & 0 & 0 \\ 0 & V_{ib} & 0 \\ 0 & 0 & V_{ic} \end{bmatrix}$ ,  $I_{in}$  是 PV 节点的注入电流。如果无

功率发生了越限,那么就必须要将 PV 节点转化为 PQ 节点,同时  $Z_v$  要重新形成和分解。

按照前面所述,可以得到整个算法的计算流程图,如图 4 所示。

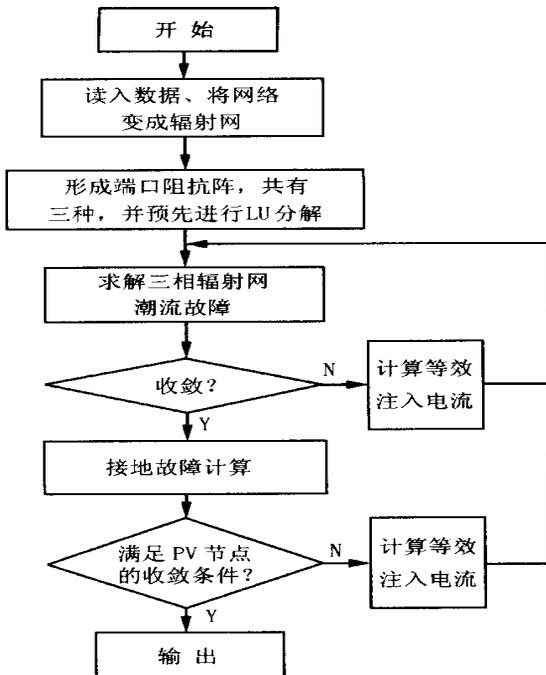


图 4 潮流故障计算流程图

Fig. 4 Flow chart of proposed power flow and short circuit calculation

表 3 不同电网结构下的故障计算时间

Tab. 3 Execution time of fault calculation in different networks s

| 故障类型 | 第一种情况 | 第二种情况 | 第三种情况 | 第四种情况 |
|------|-------|-------|-------|-------|
| 3LG  | 0.11  | 0.12  | 0.22  | 0.32  |
| LL   | 0.11  | 0.12  | 0.23  | 0.31  |
| SLG  | 0.11  | 0.12  | 0.22  | 0.29  |

## 4 算例分析

利用本文的方法对 PG&E 中的典型系统进行了仿真计算。这个系统包括一个 21 kV 的根节点,两条主馈线,是一个辐射网。通过打开、闭合不同位置的开关来模拟配电网的结构变化和环网数目的多少。计算中考虑了三种故障:三相短路接地(3LG),相间短路(LL),单相接地(SLG);四种情况:第一种

情况下无 PV 节点和环网,第二种情况下有 4 个环网无 PV 节点,第三种情况下有 10 个 PV 节点无环网,第四种情况下有 10 个 PV 节点和 4 个环网。

## 5 结语

本文在配电网三相统一潮流故障计算方法的基础上,针对这种方法的不足和缺陷,提出了将潮流和非接地故障统一计算,而接地故障按照叠加原理进行计算的方法。这种方法和弱环网的潮流计算有着相同的收敛性。在此基础上又给出了对 PV 节点的处理方法,它和潮流故障统一计算的处理方法很类似,并没有增加编程的难度,而且又符合了目前配电网中存在无功补偿的现象。

## 参考文献:

- [1] Laughton M A. The Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Coordinates, Part I: System Representation in Phase Coordinates[J]. Proc IEE,1968,115(8):1163 - 1172.
- [2] Laughton M A. The Analysis of Unbalanced Polyphase Networks by the Method of Phase Coordinates, Part II: Fault Analysis[J]. Proc IEE,1969,116(5):857 - 865.
- [3] Cheng Carol S, Dariush Shirmohammadi. A Three-phase Power Flow Method for Real-time Distribution System Analysis [J]. IEEE Trans on Power System,1995,10(2):671 - 679.
- [4] Zhang X, Soudi F, Shirmohammadi D, et al. A Distribution Short Circuit Analysis Approach Using Hybrid Compensation Method[J]. IEEE Trans on Power System,1995,10(4):2053 - 2059.
- [5] 车仁飞,李仁俊,李玉忠(CHE Ren-fei,LI Ren-jun,LI Yu-zhong). 基于叠加原理的配电网短路电流计算(Short Circuit Calculation of Distribution Network Based on Superposition Theory) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2001,12(24):22 - 24.
- [6] 吴文传,张伯明(WU Wen-chuan,ZHANG Bo-ming). 三相不平衡配电网的潮流故障统一分析方法(An Uniform Approach for Power Flow Analysis and Fault Analysis of Asymmetrical Three-phase Distribution System) [J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2002,10(20):50 - 54.
- [7] 张伯明,陈寿孙(ZHANG Bo-ming,CHEN Shou-sun). 高等电力网络分析(Advanced Analysis of Power Network) [M]. 北京:清华大学出版社(Beijing:Tsinghua University Press),1996.

(下转第 12 页 continued on page 12)

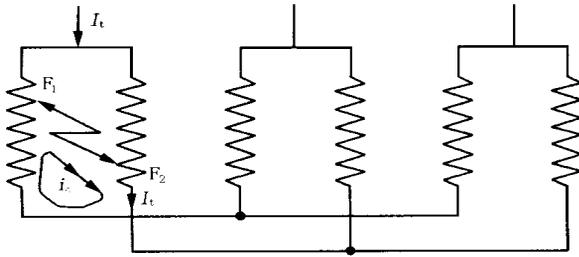


图2 双星型定子绕组单相匝间短路示意图

Fig. 2 Double-Y single-phase interturn short circuit of stator winding

图2所示,在两个并联支路中出现环流 $i_c$ 。由于该相电压下降,系统将向该相供给短路电流 $I_f$ 。 $I_f$ 主要经由故障点 $F_1$ 流向故障点 $F_2$ ,再流向中性点(由其它两相返回系统)。 $I_f$ 对故障相是穿越性,对此故障裂相横差保护能灵敏地动作。纵向完全差动保护不受 $i_c$ 影响, $I_f$ 又是穿越性的,当然不会动作。纵向不完全差动保护若比较机端和第1支路中性点侧的电流,由于这2个电流都是流入发电机的,一定能灵敏地动作;若比较机端和第2支路中性点侧的电流,那么按相位比较就不能动作,若按比率差动比较可能动作。因此B的取值就成为关键性的问题。由于穿越性电流不是负荷电流,性质上属于故障电流,故其数值一定比负荷电流大,取 $B=1.5$ 将不足。实际大型水轮发电机定子每相是多支路的,问题要复杂得多,必须通过计算才能确定B值。B值的提

高使区内故障时可靠动作,但在区外故障时允许的TA误差将下降。灵敏性与选择性永远是有矛盾的。

顺便指出纵向不完全差动保护的优点是既能反应匝间故障,又能反应相间故障,缘于它继承了裂相横差保护和纵向完全差动保护两方面的特性。由于继承了纵向完全差动保护的特性就使得纵向不完全差动保护受穿越性电流的影响,灵敏度有所下降。如果有两套纵向不完全差动保护分别比较2个支路中性点侧电流与机端电流,则必有一套纵向不完全差动保护能灵敏地动作。一套纵向不完全差动保护和一套纵向完全差动保护加一套裂相横差保护相比,节省了一个支路的TA,所获得的信息减少了,因此对故障的反应能力有所下降是必然的。

#### 参考文献:

- [1] 王维俭,张学深,田开华,等(WANG Wei-jian, ZHANG Xue-shen, TIAN Kai-hua, et al). 电气主设备纵差保护的进度(Progress of Longitudinal Differential Protection for Electrical Main Equipment). 继电器(Relay), 2000, 28(5): 6-8.

收稿日期: 2003-01-08

作者简介:

朱声石(1929-),男,教授级高工,主要从事电力系统继电保护的研究工作。

#### Comment on scalar product restraint differential relay

ZHU Sheng shi

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

**Abstract:** Characteristic of the improved scalar product restraint differential relay can also be obtained by ordinary ratio differential relay. It is important to set the parameters of the relay according to the fault characteristics. Thus the relay will get selectivity and sensitivity.

**Key words:** scalar product restraint; ratio differential relay; fault characteristic

(上接第9页 continued from page 9)

收稿日期: 2003-05-30

作者简介:

彭书涛(1978-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力

系统运行与控制;

廖培金(1944-),男,副教授,从事电力系统及其自动化的研究;

李琳(1980-),男,硕士研究生,主要研究方向是电力系统运行与稳定。

#### An approach to power flow and fault analysis of unbalanced distribution system with multi-PV nodes

PENG Shu-tao, LIAO Pei-jin, LI Lin, WANG Guang-ming

(Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** This paper proposes an approach to realize the integration of the calculation of three-phase power flow and ungrounding faults. This approach is based on forward and backward sweep method, considering characteristics of distribution system and multiport compensation technology. In order to avoid calculation divergence when the grounding voltage is zero, the grounding fault is dealt separately. Also, this paper presents a compensation method for PV node.

**Key words:** distribution system; compensation technology; PV node