

## 负荷对短路电流的影响研究

李勇<sup>1</sup>, 于芮技<sup>2</sup>, 王英英<sup>1</sup>, 李银红<sup>2</sup>, 谢俊<sup>1</sup>, 李锋<sup>1</sup>

(1. 华中电网有限公司, 湖北 武汉 430074; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 分析了现有标准规范以及文献中对于负荷的处理方法, 提出利用故障模型模拟不同类型负荷, 基于补偿方法计算及负荷的短路电流, 并定义了电压、电流变化量指标。利用上述指标, 得出负荷接入点位置、负荷水平等影响系统电压电流的一般性规律。提出了计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法, 该方法避免了对原有网络矩阵的修改, 减少了短路电流计算时间。最后用 IEEE9 节点算例验证了相关规律和结论, 并建议利用提出的指标和方法, 在短路电流计算中适当取舍负荷。

**关键词:** 故障模型; 变化量指标; 短路电流计算方法; 负荷接入点位置; 多负荷

### Research on the influence of load on short circuit current

LI Yong<sup>1</sup>, YU Ruiji<sup>2</sup>, WANG Yingying<sup>1</sup>, LI Yinhong<sup>2</sup>, XIE Jun<sup>1</sup>, LI Feng<sup>1</sup>

(1. Central China Grid Company Limited, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The method of load in standards and documents is analyzed, then different types of load are simulated by fault model. Based on compensation method, short circuit current is calculated considering load, and the voltage and current variation index are defined. With the variation index, the influence of load location and load level on the grid voltage and current is concluded. The fast method of compensating short circuit current calculation considering multiple load is proposed, the original network matrix is not modified and the time of short circuit current calculation is reduced by the method. Finally, IEEE9 node example is provided, it is suggested to use the method and index to select load on short circuit current calculation.

**Key words:** fault model; variation index; method of short circuit current calculation; load location; multiple load

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)06-0040-06

## 0 引言

短路电流计算是电力系统分析的重要内容之一, 是电力系统规划设计、继电保护整定计算、电气设备选择校验等工作的基础。短路电流计算结果的精确性将直接影响整个电网的安全运行。

目前, 关于短路电流计算的标准规范中<sup>[1-5]</sup>, 如国际标准 IEC60909、国内标准 GB/T 15544-1995、行业标准 DL/T559-2007, 均在计算短路电流时, 忽略负荷的影响, 其中国标只是考虑电动机负荷。行业标准 DL/T559-2007, 即 220~750 kV 电网继电保护装置运行整定规程, 其中明确规定, 在进行短路电流计算时, 不计及负荷电流的影响。

近些年, 随着负荷量的快速增长<sup>[6-7]</sup>, 电网逐渐接近输送功率极限运行, 一些学者注意到负荷电流

对短路电流计算产生的影响, 并做了一定的研究。文献[8]分析了现有标准规范、电力系统仿真软件等短路计算对负荷的处理方式, 重点研究配电网的综合负荷模型对于计算结果的影响; 文献[9]从感应电动机负荷模型原理入手, 研究感应电动机负荷对输电网短路电流水平的影响; 文献[10]在文献[11]的基础上, 提出了考虑适应感应电动机磁暂态过程的系统短路电流的修正计算方法, 文献[12]基于叠加原理, 给出了考虑负荷影响时重载长线路单相短路电流的计算方法, 并分析了负荷对于单相短路电流的影响。

上述文献都通过仿真结果分析了负荷模型对短路电流的影响, 部分文献也给出了计及负荷的短路电流计算方法, 但是这些方法没有结合电网拓扑结构等方面分析负荷对于短路电流计算的影响以及给

出负荷影响程度的评价指标。本文在分析补偿方法的基础上, 定义了电压、电流变化量指标, 进而从不同负荷水平、不同负荷接入点等多方面分析出其对短路电流影响的一般规律, 提出了一种计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法, 能够大大减少故障计算时间, 保证了一定的计算精确度。

## 1 补偿法基本原理

补偿法是指在网络节点处引入待求的补偿电流, 以此来模拟支路开断的影响<sup>[13-14]</sup>。

如图1所示, 在网络节点*i*、*j*之间追加阻抗 $z_{ij}$ , 这时流入原网络的注入电流将由 $I^{(0)}$ 变成 $I^{(1)}$ , 节点电压由 $U^{(0)}$ 变成 $U^{(1)}$ (0代表追加阻抗前, *n*代表追加阻抗*n*次之后, 后面类似)。

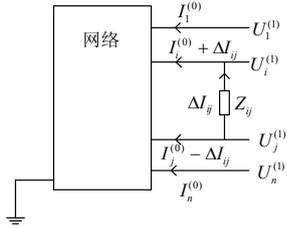


图1 节点*i*、*j*之间追加 $z_{ij}$   
Fig. 1 Add  $z_{ij}$  between node *i* and node *j*

对于线性网络, 应用叠加法原理, 通过求取 $\Delta I$ 和 $\Delta U$ , 得到补偿后的 $I^{(1)}$ 和 $U^{(1)}$ , 具体推导过程不再一一赘述, 仅给出最终的结论。

$$\Delta I = -\frac{(M^{(ij)})^T U^{(0)}}{(M^{(ij)})^T ZM^{(ij)} + z_{ij}} \quad (1)$$

$$U^{(1)} = (E - \frac{Z(M^{(ij)})(M^{(ij)})^T}{(M^{(ij)})^T ZM^{(ij)} + z_{ij}})U^{(0)} \quad (2)$$

其中:  $M^{(ij)} = [0 \cdots 1 \cdots -1 \cdots 0]^T$ ;  $Z$ 为原网络阻抗矩阵。

## 2 计及负荷的补偿短路电流计算方法

电力系统中常见的短路故障类型都可以用图2来模拟<sup>[15]</sup>。

模型的节点电压方程为

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} z_a + z_g & z_g & z_g \\ z_g & z_b + z_g & z_g \\ z_g & z_g & z_c + z_g \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

简记为

$$U_{abc} = Z_{abc} I_{abc} \quad (4)$$

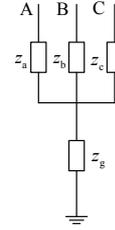


图2 故障模型  
Fig. 2 Fault model

其中:

$$U_{abc} = [U_a \quad U_b \quad U_c]^T \quad (5)$$

$$Z_{abc} = \begin{bmatrix} z_a + z_g & z_g & z_g \\ z_g & z_b + z_g & z_g \\ z_g & z_g & z_c + z_g \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$I_{abc} = [I_a \quad I_b \quad I_c]^T \quad (7)$$

若将补偿法中 $Z_{ij}$ 替换为故障模型中的 $Z_{abc}$ , 其余量都用三相来表达, 则式(1)、式(2)可以修改为

$$\Delta I = -\frac{(M^{(i)})^T U^{(0)}}{(M^{(i)})^T ZM^{(i)} + Z_{abc}} \quad (8)$$

$$U^{(1)} = (E - \frac{Z(M^{(ij)})(M^{(ij)})^T}{(M^{(ij)})^T ZM^{(ij)} + Z_{abc}})U^{(0)} \quad (9)$$

对称与不对称负荷都可以利用故障模型来模拟, 即通过对 $Z_{abc}$ 的修改。由于篇幅有限, 本文将重点研究三相对称的负荷, 在进行故障计算时, 可以将这些负荷看做是发生在节点处经过过渡阻抗接地的三相短路。

利用上述方法, 可以进行计及负荷的补偿短路电流计算, 三相对称负荷等效阻抗求解如下:

系统发生故障后, 利用短路前的潮流计算结果中的负荷电压 $U_{Li}$ 和负荷功率 $S_{Li}$ , 求得负荷的阻抗值为

$$z_{Li} = \frac{U_{Li}^2}{S_{Li}^*} \quad (10)$$

对于*m*节点电压, 则式(9)可化简为

$$U_m = U_m^{(0)} - \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} \quad (11)$$

计及负荷后*m*节点电压变化量为

$$\Delta U_m = U_m^{(0)} - U_m = \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} \quad (12)$$

可以从式(12)看出, 节点  $m$  的电压变化量与  $m$  节点和负荷点  $i$  之间的互阻抗  $Z_{mi}$  成正比关系。

$I_{Li} = U_i^{(0)} / (Z_{ii} + z_{Li})$  可以看做是在  $i$  节点处的激励电流源, 当负荷节点和负荷大小确定时, 激励电流源也就确定了。

定义节点  $m$  的电压变化量指标, 即节点  $m$  与节点  $i$  之间的电气距离为互阻抗的倒数  $1/Z_{mi}$ ,  $Z_{mi}$  越大, 节点  $m$  与节点  $i$  之间的电气距离越小, 则两者的相互影响则越大, 进而节点  $m$  的电压变化量也越大, 这也说明了不同位置的负荷, 对同一节点的电压影响是不同的。

计及负荷后, 支路  $mn$  上的电流变化量为

$$\Delta I_{mn} = \frac{U_m^{(0)} - U_n^{(0)}}{z_{mn}} - \frac{U_m - U_n}{z_{mn}} = \frac{Z_{mi} - Z_{ni}}{z_{mn}} \cdot \frac{U_i^{(0)}}{Z_{ii} + z_{Li}} \quad (13)$$

可以从式(13)看出, 支路  $mn$  上的电流变化量与支路两节点和故障点  $i$  之间的互阻抗差  $Z_{mi} - Z_{ni}$  成正比, 与支路阻抗  $z_{mn}$  成反比。

定义支路  $mn$  电流变化量指标  $K_{mn} = (Z_{mi} - Z_{ni}) / z_{mn}$ , 支路  $mn$  上的电流变化量与支路  $mn$  电流变化量指标  $K_{mn}$  成正比关系, 它反映了节点  $i$  处的负荷对于任意一条支路的影响程度, 若  $K_{mn}$  值越大, 则表明此节点负荷对与整个系统网络影响较大。

### 3 计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法

上节提到, 本文将负荷看做是经过过渡阻抗接地的三相短路, 因此, 可以将多负荷问题转化为多重故障问题。传统的多重故障短路电流计算方法, 尽管精确性比较高, 但是在计算短路电流时, 需要更新网络的阻抗矩阵, 从而增加了计算时间, 本方法将克服此类问题。

对于多重故障, 本方法将继续利用上节补偿法的思路计算。对于双重故障, 当第二次故障时, 其补偿作用必须在第一次故障后的网络基础上进行。设第一次故障发生处为节点  $i$ , 第二次故障发生处节点为  $j$ , 则双重故障后的  $m$  节点电压为

$$U_m^{(2)} = U_m^{(1)} - \frac{Z_{mj}^{(1)}}{Z_{jj}^{(1)} + z_{Lj}} U_j^{(1)} = U_m^{(0)} - \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} - \frac{Z_{mj}^{(1)}}{Z_{jj}^{(1)} + z_{Lj}} U_j^{(0)} + \frac{Z_{mj}^{(1)}}{Z_{jj}^{(1)} + z_{Lj}} \cdot \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} \quad (14)$$

由于  $\frac{Z_{mj}^{(1)}}{Z_{jj}^{(1)} + z_{Lj}}$  与  $\frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}}$  都是小于 1 的, 故此处

忽略  $\frac{Z_{mj}^{(1)}}{Z_{jj}^{(1)} + z_{Lj}} \cdot \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)}$ , 并简化认为  $\frac{Z_{mj}^{(1)}}{Z_{jj}^{(1)} + z_{Lj}} \approx \frac{Z_{mj}}{Z_{jj} + z_{Lj}}$ , 从而式(14)简化为

$$U_m^{(2)} \approx U_m^{(0)} - \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} - \frac{Z_{mj}}{Z_{jj} + z_{Lj}} U_j^{(0)} \quad (15)$$

式(15)可以理解为在第二次故障时, 其是在原始网络基础上进行补偿作用的, 即第一次故障和第二次故障是叠加关系。

基于此, 可以类推推出  $n$  重故障后,  $m$  节点的电压为

$$U_m^{(n)} \approx U_m^{(0)} - \sum_{i=1}^n \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} \quad (16)$$

$m$  节点电压变化量为

$$\Delta U_m = U_m^{(n)} - U_m^{(0)} = \sum_{i=1}^n \frac{Z_{mi}}{Z_{ii} + z_{Li}} U_i^{(0)} \quad (17)$$

支路  $mn$  电流变化量为

$$\Delta I_{mn} = \sum_{i=1}^n \frac{Z_{mi} - Z_{ni}}{Z_{mn}} \cdot \frac{U_i^{(0)}}{Z_{ii} + z_{Li}} \quad (18)$$

上述计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法不需要对原有的网络阻抗矩阵进行修改, 计算用到的参数全部与不考虑负荷时故障计算用到的参数一样, 只需要计算出等效负荷阻抗即可, 此方法可大大减少故障计算时间, 而且本方法比较直观实用方便, 有一定的精确度的保证。

### 4 算例

以 IEEE9 节点系统为例, 如图 3 所示。利用 PSASP 中的短路电流计算模块对 IEEE9 节点系统进行仿真。在计算短路电流过程中, 采用基于方案的方式, 发电机内电势为  $E=1\angle 0^\circ$ , 在母线 4 处发生三相接地短路, 算例中所有电气量数据均为标么值。

#### 4.1 单个负荷对系统短路电压电流的影响

母线 7 上分别设置  $S_{LA1}=0.5+0.2j$ ,  $S_{LA2}=1.25+0.5j$ ,  $S_{LA3}=2+0.8j$ , 对这三种负荷水平分别进行短路电流计算, 结果如表 1 和表 2 所示。其中,  $\Delta U_{LAi}$  为计及负荷 LAi 前后, 各个节点短路电压差,  $i$  取 1、2、3;  $\Delta I_{LAi}$  为计及负荷 LAi 前后, 各个支路短路电流差,  $i$  取 1、2、3。

三种不同负荷水平的激励电流为

$$I_{L1}=0.1029, I_{L2}=0.2496, I_{L3}=0.3917$$

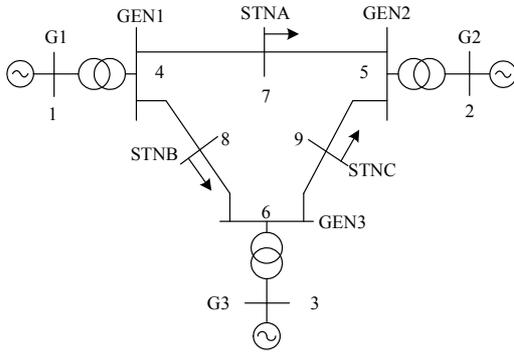


图 3 IEEE 标准 9 节点系统

Fig. 3 IEEE node 9 system

从表 1 和表 2 中可以看出, 任一负荷水平下的激励电流  $I_{JLi}$  都与  $\Delta U_{LAi} / Z_{i7}$ 、 $\Delta I_{LAi} / K_{mn}$  相等, 验证了计及负荷的实用短路电流计算方法的正确性; 不同负荷水平下, 激励电流不同, 从而造成电压和电流变化量的不同。考虑到计算误差在合理范围内, 表中的数据表明电压变化量以及电流变化量都与激励电流成正比的关系, 此结论与式(12)和式(13)推导得出的结论一致。

从表 1、表 2 可以得出, 计及负荷前后电压差幅值基本与负荷节点互阻抗成正比关系, 计及负荷前后电流幅值与电流变化量指标成正比关系, 此结论与式(12)和式(13)分析得出的结论一致。

表 1 计及节点 7 处不同负荷的各节点短路电压

Table 1 Short-circuit voltage of each node considering different load level on node 7

| 母线 | $\Delta U_{LA1}$ | $\frac{\Delta U_{LA1}}{Z_{i7}}$ | $\Delta U_{LA2}$ | $\frac{\Delta U_{LA2}}{Z_{i7}}$ | $\Delta U_{LA3}$ | $\frac{\Delta U_{LA3}}{Z_{i7}}$ | $Z_{i7}$ |
|----|------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|----------|
| 2  | 0.001 9          | 0.108                           | 0.004 5          | 0.255 7                         | 0.006 9          | 0.392                           | 0.017 6  |
| 3  | 0.000 9          | 0.104 7                         | 0.002 1          | 0.244 2                         | 0.003 3          | 0.383 7                         | 0.008 6  |
| 5  | 0.002 8          | 0.104 5                         | 0.006 7          | 0.25                            | 0.010 4          | 0.388 1                         | 0.026 8  |
| 6  | 0.001 2          | 0.106 2                         | 0.002 9          | 0.256 6                         | 0.004 4          | 0.389 4                         | 0.011 3  |
| 7  | 0.006 7          | 0.102 4                         | 0.016 4          | 0.250 8                         | 0.025 5          | 0.389 9                         | 0.065 4  |
| 8  | 0.000 4          | 0.1                             | 0.001            | 0.25                            | 0.001 5          | 0.375                           | 0.004    |
| 9  | 0.002 1          | 0.102 9                         | 0.005 1          | 0.25                            | 0.007 9          | 0.387 3                         | 0.020 4  |

表 2 计及节点 7 处不同负荷的各支路短路电流

Table 2 Short-circuit current of each branch considering different load level on node 7

| 支路  | $\Delta I_{LA1}$ | $\frac{\Delta I_{LA1}}{K_{mn}}$ | $\Delta I_{LA2}$ | $\frac{\Delta I_{LA2}}{K_{mn}}$ | $\Delta I_{LA3}$ | $\frac{\Delta I_{LA3}}{K_{mn}}$ | $K_{mn}$ |
|-----|------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|------------------|---------------------------------|----------|
| 5—9 | 0.009 2          | 0.104 1                         | 0.022 3          | 0.252 3                         | 0.034 7          | 0.392 5                         | 0.088 4  |
| 6—8 | 0.004 2          | 0.100 2                         | 0.010 5          | 0.250 6                         | 0.016 6          | 0.396 2                         | 0.041 9  |
| 7—5 | 0.024 3          | 0.102 9                         | 0.059 3          | 0.251 2                         | 0.092            | 0.389 7                         | 0.236 1  |
| 9—6 | 0.009 2          | 0.102 6                         | 0.022 3          | 0.248 6                         | 0.034 7          | 0.386 8                         | 0.089 7  |
| 2—5 | 0.015            | 0.101 8                         | 0.036 7          | 0.249 2                         | 0.057 3          | 0.389                           | 0.147 3  |
| 3—6 | 0.005 1          | 0.110 6                         | 0.011 8          | 0.256                           | 0.018 5          | 0.401 3                         | 0.046 1  |

由上述结论可知, 可以利用电压、电流变化量指标对负荷按照影响程度进行筛选, 在计算短路电流时, 适当地考虑部分重要的负荷。

#### 4.2 多负荷对系统短路电压电流的影响

IEEE9 节点系统给出了 3 个负荷节点, 故将设置 1 个负荷(节点 7 处)、2 个负荷(节点 7、8 处)、3 个负荷(节点 7、8、9 处)来进行短路仿真计算, 所有负荷均为额定负荷。  $\Delta U^{(i)}$  为计及  $i$  个负荷前后, 各个节点短路电压差,  $i$  取 1、2、3;  $\Delta I^{(i)}$  为计及  $i$  个负荷前后, 各个支路短路电流差,  $i$  取 1、2、3。  $U^{(0)}$  为不计及负荷短路时, 各个节点电压;  $I^{(0)}$  为不

计及负荷短路时, 各个支路电流。

从表 3 和表 5 中可以看出, 利用本文提出的计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法与精确的补偿计算方法差别很小, 而本方法不需要重新修改阻抗矩阵, 大大减少了计算时间, 更简单直接地给出多个负荷对某节点电压以及某条支路电流的影响。

从表 4 和表 6 中可以看出, 随着系统总负荷水平的不断增加, 即负荷的接入不断增加, 计及负荷与不计及负荷的节点电压差异不断增大, 7、8、9 节点差别已经达到了 11% 以上; 计及负荷与不计及负荷的支路电流差异也不断增大, 部分支路如 5-9、

9-6 差别已经达到了两倍左右。因而有必要在短路计算时,考虑负荷的影响。

表3 计及多个负荷的各节点短路电压

Table 3 Short-circuit voltage of each node considering multiple load

| 母线名 | $\Delta U^{(1)}$ |         | $\Delta U^{(2)}$ |         | $\Delta U^{(3)}$ |         |
|-----|------------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|
|     | 补偿法              | 本文方法    | 补偿法              | 本文方法    | 补偿法              | 本文方法    |
| 2   | 0.004 5          | 0.004 4 | 0.005 7          | 0.005 7 | 0.027 7          | 0.027 5 |
| 3   | 0.002 1          | 0.002 2 | 0.006 2          | 0.006 2 | 0.029 9          | 0.029 6 |
| 5   | 0.006 7          | 0.006 7 | 0.008 6          | 0.008 7 | 0.042 2          | 0.041 7 |
| 6   | 0.002 9          | 0.002 8 | 0.008 2          | 0.008 2 | 0.039 6          | 0.039 1 |
| 7   | 0.016 4          | 0.016 4 | 0.017            | 0.017 1 | 0.028 6          | 0.027 9 |
| 8   | 0.00 1           | 0.001   | 0.013 4          | 0.013 5 | 0.024 4          | 0.024   |
| 9   | 0.005 1          | 0.005 1 | 0.008 5          | 0.008 5 | 0.065            | 0.064 3 |

表4 计及负荷与不计及负荷各节点电压差异

Table 4 Differences of each node short-circuit voltage between considering load and not considering load

| 母线名 | $U^{(0)}$ | $\Delta U^{(1)}/U^{(0)}$ | $\Delta U^{(2)}/U^{(0)}$ | $\Delta U^{(3)}/U^{(0)}$ |
|-----|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 2   | 0.715     | 0.629%                   | 0.797%                   | 3.874%                   |
| 3   | 0.656 2   | 0.320%                   | 0.945%                   | 4.557%                   |
| 5   | 0.567 1   | 1.181%                   | 1.516%                   | 7.441%                   |
| 6   | 0.545 9   | 0.531%                   | 1.502%                   | 7.254%                   |
| 7   | 0.194 5   | 8.432%                   | 8.740%                   | 14.704%                  |
| 8   | 0.190 6   | 0.525%                   | 7.030%                   | 12.802%                  |
| 9   | 0.558 3   | 0.913%                   | 1.522%                   | 11.642%                  |

表5 计及多处负荷的各支路短路电流

Table 5 Short-circuit current of each branch considering multiple load

| 支路名 | $\Delta I^{(1)}$ |         | $\Delta I^{(2)}$ |         | $\Delta I^{(3)}$ |         |
|-----|------------------|---------|------------------|---------|------------------|---------|
|     | 补偿法              | 本文方法    | 补偿法              | 本文方法    | 补偿法              | 本文方法    |
| 5—9 | 0.022 3          | 0.022 1 | 0.003 2          | 0.003   | 0.311 8          | 0.314 4 |
| 6—8 | 0.010 5          | 0.010 5 | 0.030 8          | 0.031   | 0.087            | 0.086 7 |
| 7—5 | 0.059 3          | 0.059 1 | 0.051 1          | 0.051 3 | 0.084            | 0.083   |
| 9—6 | 0.022 3          | 0.022 5 | 0.003 2          | 0.003 3 | 0.248 3          | 0.250 2 |
| 2—5 | 0.036 7          | 0.036 9 | 0.047 7          | 0.047 8 | 0.228 8          | 0.231 4 |
| 3—6 | 0.011 8          | 0.011 5 | 0.034 3          | 0.034   | 0.163 2          | 0.165 2 |

表6 计及负荷与不计及负荷各节点电流差异

Table 6 Differences of each branch short-circuit current between considering load and not considering load

| 支路名   | $I^{(0)}$ | $\Delta I^{(1)}/I^{(0)}$ | $\Delta I^{(2)}/I^{(0)}$ | $\Delta I^{(3)}/I^{(0)}$ |
|-------|-----------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 5—9   | 0.127 2   | 17.531%                  | 2.516%                   | 245.13                   |
| 6—8   | 2.037 6   | 0.515%                   | 1.512%                   | 4.270                    |
| 7—5   | 2.272 5   | 2.609%                   | 2.249%                   | 3.696                    |
| 9—6   | 0.127 2   | 17.531%                  | 2.516%                   | 195.20                   |
| 2—5   | 2.396 6   | 1.531%                   | 1.990%                   | 9.547                    |
| 3—6   | 1.913     | 0.617%                   | 1.793%                   | 8.531                    |
| 故障节点4 | 12.739 9  | 1.587%                   | 2.684%                   | 4.572                    |

基于上述结论,在进行短路电流计算时,可以利用本文提出的电压、电流变化量指标,对各个节点处的负荷进行影响性评估,按照负荷影响程度与重要性进行排列,并依据自身划定的标准,适当取舍负荷后,再利用本文提出的计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法进行短路电流计算,可大大减少计算时间。

## 5 结论

随着我国电力需求的快速增长,负荷电流不断增大,其对短路电流的影响不容忽视。本文首先分析了现有标准规范以及文献中对于负荷的处理方法,提出了电压、电流变化量指标,得出负荷接入点位置、负荷水平等影响系统电压电流的一般性规律,其中计及负荷后,节点电压变化量与节点间的电气距离 $1/Z_{mi}$ 大小成反比,支路电流变化量与电流变化量指标 $K_{mn}$ 成正比关系,接着提出了计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法,减少了短路电流计算时间,最后用IEEE9节点验证了相关结论,并建议可利用本文提出的电压、电流变化量指标,在短路电流计算中适当取舍负荷,并利用计及多负荷的快速补偿短路电流计算方法进行快速短路电流计算。

## 参考文献

- [1] IEC 60909 (2001) Short circuit currents in three-phase AC systems[S]. 2001.
- [2] 王禹,王主丁,张宗益,等.国内外常用短路电流计算标准和方法的比较研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(20):148-152.  
WANG Yu, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. Comparison and research on the commonly used standards and methods of short-circuit current calculation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 148-152.
- [3] GB/T 15544—1995 三相交流系统短路电流计算[S].北京:中国标准出版社,1996.  
GB/T 15544—1995 short-circuit current calculation in three-phase AC systems[S]. Beijing: Standards Press of China,1996.
- [4] DL/T559-2007 220-750 kV 电网继电保护装置运行整定规程[S].北京:国家电网公司,2007.  
DL/T559-2007 setting guide for 220-750 kV power system protection equipment[S]. Beijing: State Grid Corporation of China, 2007.
- [5] 田华,王卿,朱峰,等.基于PSASP程序的短路电流计算结果分析比较探讨[J].电力系统保护与控制,2010,38(1):56-60.

- TIAN Hua, WANG Qing, ZHU Feng, et al. Comparative study of short-circuit current calculation results based on PSASP software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 56-60.
- [6] 黄玉龙, 陈迅, 刘明波, 等. 动态负荷模型参数辨识的微分进化算法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(11): 270-277.  
HUANG Yulong, CHEN Xun, LIU Mingbo, et al. Differential evolution algorithm for dynamic load model parameter identification[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(11): 270-277.
- [7] 贺仁睦, 叶静, 徐欢, 等. 计及频率特性的实测负荷建模[J]. 电工技术学报, 2011, 26(5): 165-170.  
HE Renmu, YE Jing, XU Huan, et al. Measurement-based load modeling considering frequency characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 165-170.
- [8] 刘楠, 唐晓骏, 马世英, 等. 负荷模型对电力系统短路电流计算的影响[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 145-149.  
LIU Nan, TANG Xiaojun, MA Shiyong, et al. Influences of load models on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 145-149.
- [9] 刘楠, 张彦涛, 秦晓辉, 等. 感应电动机负荷对短路电流影响机理研究[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 187-192.  
LIU Nan, ZHANG Yantao, QIN Xiaohui, et al. Impact of load induction motor on power system short-circuit current calculation[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 187-192.
- [10] 尹建华. 考虑感应电动机负荷电磁暂态特性的系统短路电流计算方法[J]. 南方电网技术, 2010, 4(3): 62-66.  
YIN Jianhua. A short circuit current calculation method in power system with consideration of the electromagnetic transient characteristics of induction motor's load[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(3): 62-66.
- [11] 康家义, 康欢. 大容量异步电动机的短路反馈电流[J]. 贵州科学, 1997, 15(4): 280-285.  
KANG Jiayi, KANG Huan. The short-circuit feedback current of large capacity of asynchronous electrical motor[J]. Guizhou Science, 1997, 15(4): 280-285.
- [12] 李荣华. 负荷对重载长线路单相短路电流的影响研究[J]. 湖南理工学院学报, 2010, 23(3): 69-71.  
LI Ronghua. Research on the influence on heavily loaded long circuit single-phase impedance current[J]. Journal of Hunan Institute of Science and Technology, 2010, 23(3): 69-71.
- [13] 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.
- [14] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.
- [15] 冯树海, 於益军, 王礼文, 等. 适用于拓扑调整的短路电流快速计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 28-33.  
FENG Shuhai, YU Yijun, WANG Liwen, et al. A method of fast short-circuit current calculation for topology adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 28-33.

收稿日期: 2014-06-11; 修回日期: 2014-08-14

作者简介:

李 勇(1972-), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电网运行分析和管

于芮技(1990-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为继电保护整定和校核计算; E-mail: yuruiji2013@163.com

王英英(1982-), 女, 博士, 主要从事配电网故障诊断、电力系统连锁故障和大电网风险评估研究。

(编辑 周金梅)