

## 电阻接地的并网光伏电站零序电流工程实用算法

吴兴全<sup>1</sup>, 吴丽<sup>1</sup>, 李召兄<sup>1</sup>, 李政<sup>2</sup>, 曾燕婷<sup>2</sup>, 卢继平<sup>2</sup>

(1. 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司, 甘肃 兰州 730050;

2. 重庆大学电气工程学院输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 集中式并网光伏电站广泛采用中性点经电阻接地的方式运行, 要求在出现接地短路时快速切除故障, 研究电阻接地并网光伏电站的零序短路电流计算具有重要意义。为此提出一种中性点经电阻接地的并网光伏电站的零序短路电流工程计算方法。该方法既考虑了并网规定对光伏逆变器低电压穿越的控制要求, 同时通过查表的方式可以方便地确定计算公式中各参数的取值, 零序电流的求解简单直接。通过一个实际的并网光伏电站进行算例验证, 结果证明了该方法的实用性和有效性。

**关键词:** 光伏电站; 中性点接地电阻; 低电压穿越; 零序电流; 工程算法

### An engineering calculation method for zero-sequence current of grid-connected photovoltaic station with neutral grounding resistance

WU Xingquan<sup>1</sup>, WU Li<sup>1</sup>, LI Zhaoxiong<sup>1</sup>, LI Zheng<sup>2</sup>, ZENG Yanting<sup>2</sup>, LU Jiping<sup>2</sup>

(1. China Energy Engineering Corporation Limited Gansu Electric Power Design Institute, Lanzhou 730050, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** A centralized grid-connected photovoltaic (PV) station is a widely adopted method of neutral grounding using resistance. It requires that the fault can be quickly removed in the event of grounding faults. Therefore, the study of short circuit zero sequence current calculation of grid-connected PV station is of great significance. To this end, an engineering calculation method for zero-sequence current of grid-connected PV station with neutral grounding resistance is proposed. This method takes into account the requirement for grid control of the photovoltaic inverter Low-Voltage Ride Through (LVRT), at the same time, the value of each parameter in the formula can be easily determined by looking up the table, the solution of zero-sequence current is simple and direct. Through an actual PV station for calculation example, and the results verify the practicability and validity of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577018).

**Key words:** PV station; neutral grounding resistance; LVRT; zero-sequence current; engineering methods

## 0 引言

根据国家能源局下发的《太阳能发展“十三五”规划》, 到2020年底, 太阳能发电装机达到1.1亿kW以上, 其中, 光伏发电装机达到1.05亿kW以上。光伏发电在电力系统中的应用越来越广泛, 太

阳能资源地理分布存在差异性<sup>[1-2]</sup>, 大规模集中式光伏发电并网接入电力系统是我国光伏发电应用的重要形式<sup>[3-4]</sup>。

集中式并网光伏电站一般是通过专用的送出线路接入电网<sup>[5]</sup>, 并不直接带负荷, 因此带故障运行并不能提高用电可靠性, 伴随的过电压又容易引发新的故障。国内已出现多起因单相接地故障不能快速切除导致故障扩大, 并成为光伏电站大规模脱网的主要原因<sup>[6]</sup>。因此目前集中式并网光伏电站已广泛采用中性点经电阻接地的方式运行, 要求在出现接地短路时快速切除故障<sup>[7]</sup>, 这给继电保护提出

**基金项目:** 国家自然科学基金面上项目(51577018); 中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司科技项目资助(G-2015-11-18-01); 高等学校学科创新引智计划(“111”计划)资助项目(B08036)

了新的要求, 而光伏站并网系统的故障分析对于保护整定至关重要<sup>[8-10]</sup>。

传统电网的短路电流计算, 主要包括三种方法: 序分量法, 相分量法, 序分量与相分量结合法<sup>[11]</sup>。光伏为采用变流器接口的逆变型分布式电源(Inverter Interfaced Distributed Generator, IIDG), 目前针对含 IIDG 的电网故障计算的文献相对较少, 现有文献对于 IIDG 的处理方法主要采用等值电压源或电流源的方式。文献[12]将 IIDG 等值为变化的电压源与恒定阻抗串联的模型, 通过数值解法近似求解每个步长下的电压源暂态电压; 文献[13-14]计及光伏电源的非线性特性, 将光伏电源等值为恒定电压源与变化的等值阻抗串联的模型, 但没给出等值阻抗的具体求解方法; 文献[15]设故障前后变流器功率不变, 建立电流控制 IIDG 短路计算的电压控电流源模型; 文献[16-17]建立计及故障穿越无功支持的电流控制光伏电源短路计算模型; 文献[18]对含负序电流注入的 IIDG 故障电流进行了详细分析, 提出短路计算模型与网络方程交互迭代求解短路电流的方法。

以上研究对于含有 IIDG 的故障分析做了行之有效的探索, 但目前对于中性点经电阻接地的 IIDG

并网系统的故障分析研究还很缺乏, 中性点经电阻接地的系统零序网络和不接地或经消弧线圈接地的系统区别很大, 特别是零序电流的故障特性产生了很大变化, 而零序电流恰恰是研究接地保护的关键。另外, 现有的考虑控制策略的短路计算方法需要求解复杂的非线性方程组, 利用短路计算模型与网络方程交互迭代方能获得短路计算结果, 这类方法迭代计算量大, 且不能满足工程计算要求, 对于电力设计人员而言急需一种既考虑控制策略又简单有效的工程应用算法。

本文以中性点经电阻接地的光伏电站并网系统为研究对象, 提出了一种考虑逆变器控制策略, 且便于工程应用的零序故障电流计算方法, 充分考虑了零序电流的各种影响因素, 最后, 结合工程算例计算了单相和两相接地故障的零序电流。

## 1 计算原理

### 1.1 中性点经电阻接地的光伏电站并网系统

图 1 为一典型中性点经电阻接地的光伏电站并网系统, 其中  $K$  为短路点。

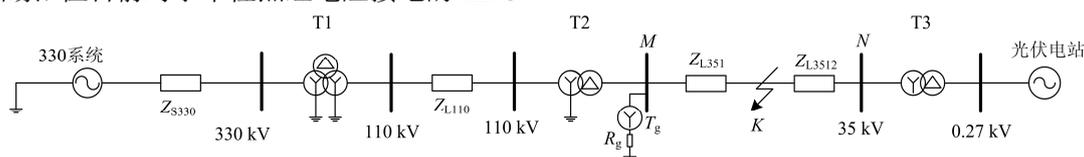


图 1 中性点经电阻接地的光伏并网系统

Fig. 1 Grid-connected PV power station with neutral grounding by a resistance

图 1 中, T2 为光伏站并网升压变, 变比 110/35 kV, 110 kV 侧为公网, 本文仅讨论 35 kV 侧, 即光伏并网部分发生接地故障的零序电流计算。

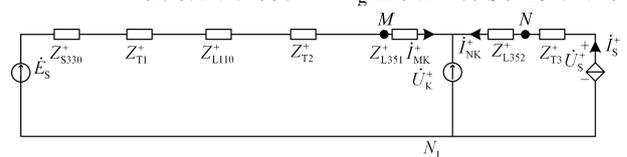
光伏侧, 逆变电源经箱式变压器由 270 V 升到 35 kV, 汇入汇集母线, 再经过一段 35 kV 联络线路送至系统升压站, 这种情况在光伏扶贫工程中很常见, 因扶贫站功率相对较小, 不需要就地建升压站, 一般会通过一段 35 kV 线路送到附近的升压站并网。

系统侧, 330 kV 系统短路阻抗  $Z_{S330}$ , 110 kV 线路和 35 kV 线路阻抗分别为  $Z_{L110}$  和  $Z_{L35}$ , 330 kV 主变 T1 变比 330/110/35 kV, 接线方式为 Yg/yg/d, 110 kV 变压器 T2 变比 110/35 kV, 接线方式 Yg/d, T2 的 35 kV 侧通过接地变压器  $T_g$  经电阻  $R_g$  接地。

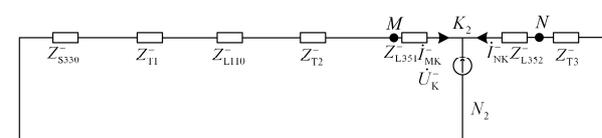
工程应用中光伏逆变器通常采用正序控制, 呈现压控电流源特性, 将短路电流的正序分量注入网络, 等效序网图如图 2 所示。

图 2 中,  $\dot{E}_s$  为系统电源,  $\dot{U}_s^+$ 、 $\dot{I}_s^+$  为故障后光伏源的端电压和短路电流正序分量。由于升压变

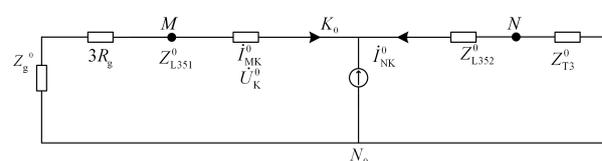
35 kV 侧为三角形接线, 不能将零序电流传递给外电路, 因此零序网络中 330 kV 和 110 kV 网络与 35 kV 网络断开成两部分。 $3R_g$  上游只有接地变的零



(a) 正序网络拓扑



(b) 正序网络拓扑



(c) 零序网络拓扑

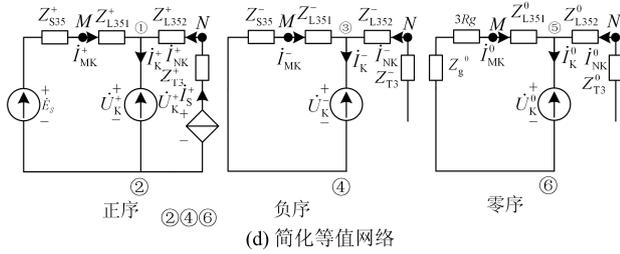


图 2 35 kV线路故障正负零序网络

Fig. 2 Network of positive, negative and zero sequence for the fault on the 35 kV line

序阻抗  $Z_g^0$  进入零序网络, 因此零序网络综合阻抗  $Z_{\Sigma 0}$  与 330 系统阻抗(运行方式), 330 主变和 110 线路阻抗及升压变零序阻抗均没有关系。

图 2(b)中,  $Z_{S35}$  为系统正负序等效阻抗, 由 330 系统阻抗  $Z_{S330}$ 、330 主变阻抗  $Z_{T1}$ 、110 kV 线路阻抗  $Z_{L110}$  和升压变阻抗  $Z_{T2}$  串联而成。

$$Z_{S35} = Z_{S330} + Z_{T1} + Z_{L110} + Z_{T2} \quad (1)$$

### 1.2 单相接地零序电流计算

当故障类型为单相接地时, 有故障边界条件为  $\dot{U}_K^+ + \dot{U}_K^- + \dot{U}_K^0 = 0$  且  $\dot{I}_K^+ = \dot{I}_K^- = \dot{I}_K^0$ , 复合序网如图3所示。

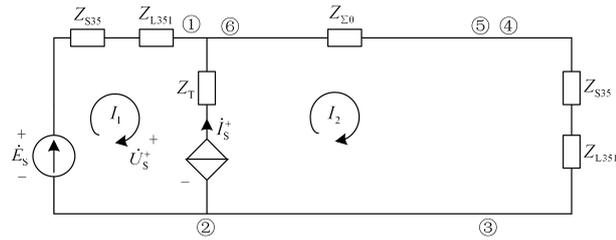


图 3 单相接地复合序网图

Fig. 3 Complex sequence network of single phase to ground fault

图3中,  $Z_{\Sigma 0} = Z_g^0 + 3R_g + Z_{L351}^0$ , 由回路电流法可得回路电流方程组如下:

$$\begin{cases} (Z_{S35} + Z_{L351} + Z_T)\dot{I}_1 - Z_T\dot{I}_2 = \dot{E}_S - \dot{U}_S^+ \\ -Z_T\dot{I}_1 + (Z_{S35} + Z_{L351} + Z_T + Z_{\Sigma 0})\dot{I}_2 = \dot{U}_S^+ \\ \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = \dot{I}_S^+ \text{ 且 } \dot{I}_2 = \dot{I}_K^0 \end{cases} \quad (2)$$

回路电流方程是由复合序网图推得, 所以既包含了三序网络方程, 也含有故障边界条件, 由式(1)可以推得:

$$\dot{I}_{K.S}^0 = \frac{\dot{E}_S + (Z_{S35} + Z_{L351})\dot{I}_S^+}{2(Z_{S35} + Z_{L351}) + Z_{\Sigma 0}} \quad (3)$$

式(3)为单相接地零序电流  $\dot{I}_{K.S}^0$  的计算公式。

### 1.3 两相接地零序电流计算

当故障类型为两相接地时, 有故障边界条件:  $\dot{U}_K^+ = \dot{U}_K^- = \dot{U}_K^0$  且  $\dot{I}_K^+ + \dot{I}_K^- + \dot{I}_K^0 = 0$ , 复合序网如图4所示。

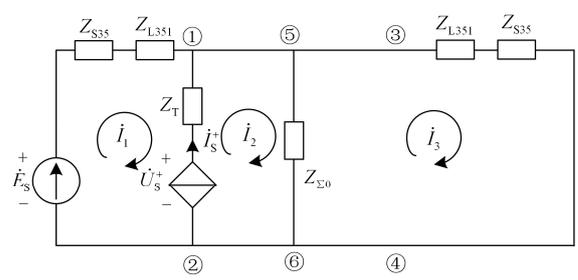


图 4 两相接地故障复合序网图

Fig. 4 Complex sequence network of double phase to ground fault

回路电流法可得回路电流方程组如下:

$$\begin{cases} (Z_{S35} + Z_{L351} + Z_T)\dot{I}_1 - Z_T\dot{I}_2 = \dot{E}_S - \dot{U}_S^+ \\ -Z_T\dot{I}_1 + (Z_T + Z_{\Sigma 0})\dot{I}_2 - Z_{\Sigma 0}\dot{I}_3 = \dot{U}_S^+ \\ -Z_{\Sigma 0}\dot{I}_2 + (Z_{S35} + Z_{L351} + Z_{\Sigma 0})\dot{I}_3 = 0 \\ \dot{I}_2 - \dot{I}_1 = \dot{I}_S^+ \text{ 且 } \dot{I}_3 - \dot{I}_2 = \dot{I}_K^0 \end{cases} \quad (4)$$

由式(3)推得:

$$\dot{I}_{K.T}^0 = -\frac{\dot{E}_S + (Z_{S35} + Z_{L351})\dot{I}_S^+}{Z_{S35} + Z_{L351} + 2Z_{\Sigma 0}} \quad (5)$$

式(5)为两相接地零序电流  $\dot{I}_{K.T}^0$  的计算公式。

基于上述分析, 已将零序电流的计算简化到运用公式(3)和式(5)求解即可, 下面进一步讨论公式中各参数的确定。

## 2 零序电流计算参数

系统电源  $\dot{E}_S$  始终不变,  $Z_{S35}$  受 330 kV 系统阻抗(运行方式)影响,  $Z_{L351}$  受故障点位置变化影响, 中性点接地电阻  $R_g$  为了消除弧光过电压, 取值将受光伏电站总的对地电容电流大小的影响。

总之, 只要取定某个光伏电站并网系统, 前述系统电源和各阻抗参数都容易确定, 因此该算法的主要难点在于光伏电站输出短路电流  $\dot{I}_S^+$  的确定上, 下面重点分析如何确定受控电流源  $\dot{I}_S^+$  的取值。

### 2.1 光伏受控源影响因素

国家电网公司关于光伏电站接入电网的技术规范<sup>[19]</sup>明确要求大中型光伏电站应具备低电压穿越运行能力。因此, 准确的故障分析必须基于 LVRT 控制策略的影响研究。文献[20]给出了含 LVRT 控制策略的光伏受控电流源数学模型如式(6)所示。

$$I_S^+ = \frac{(P^* + Q^* e^{-j\pi/2})U_S^+}{|U_S^+|^2} \quad (6)$$

分析此数学模型可知  $I_s^+$  的影响因素有哪些。式(6)右侧自变量有光伏源端电压  $U_s^+$  以及光伏源的有功参考  $P^*$  和无功参考  $Q^*$ 。

光伏源端压  $U_s^+$  主要与三个因素有关:

1) 故障类型, 单相接地和两相接地引起的端电压跌落明显不同。

2) 光伏电源并网点 PCC 与故障点  $K$  之间的距离(故障点位置), PCC 与  $K$  之间的距离越远, 光伏源受故障影响较小, 端电压跌落较少则  $U_s^+$  相对较高, 反之  $U_s^+$  较低。

3) 中性点接地电阻阻值的变化改变了故障复合序网络中的阻抗分布, 也会影响到端压。

有功  $P^*$  和无功  $Q^*$  的首要决定因素是光伏源的容量, 明显有光伏源容量越大, 则输出的有功和无功功率越大, 反之越小; 其次由于采用了含故障穿越的控制策略, 功率输出也受光伏源端压  $U_s^+$  的影响, 因此与上述三方面因素有关。

综上所述,  $I_s^+$  主要受以下四个因素决定:

故障类型; 故障点位置  $d_K$ ; 中性点接地电阻  $R_g$ ; 光伏源容量  $S_{PV}$ 。

## 2.2 最大最小值和查表法

基于以上分析, 为了实现满足工程应用需求的实用算法, 提出两种  $I_s^+$  的取值方法。

1) 最大最小值法:  $I_s^+$  的取值是为了计算零序电流, 零序电流的计算是为了给零序保护的整定和校验提供依据, 因此最简单的方法是以准确计算结果为依据, 取出使  $i_{K,S}^0$  最大和最小的  $i_{SS,MAX}^+$ 、 $i_{SS,MIN}^+$  和使  $i_{K,T}^0$  最大和最小的  $i_{ST,MAX}^+$ 、 $i_{ST,MIN}^+$ , 计算出的单相接地和两相接地的零序电流最大最小值分别用于保护整定和灵敏度校验。各容量光伏电站电流源  $i_{SS,MAX}^+$ 、 $i_{SS,MIN}^+$  和  $i_{ST,MAX}^+$ 、 $i_{ST,MIN}^+$  见  $I_s^+$  取值表后。

2) 查表法: 以交替迭代准确计算的结果为依据, 结合四个决定因素制作出  $I_s^+$  取值表, 从表中可以查得在不同条件下的光伏电流源  $I_s^+$  取值, 代入式(2)和式(4)就可以方便地求得各种条件下的零序电流。

表 1—表 3 是扶贫工程常用的各种容量(20 MW、10 MW、5 MW)光伏电站在联络线路上发生接地故障时的电流源  $I_s^+$  取值表。

表 1 20 MW 光伏源取值

Table 1 Value of 20 MW PV power

| 故障类型 | 中性点电阻 $R_g/\Omega$ | $I_{S,PU}$ 在不同故障位置的取值/标么值 |       |       |
|------|--------------------|---------------------------|-------|-------|
|      |                    | 线路首端                      | 线路中点  | 线路末端  |
| 单相接地 | 20                 | 1.067                     | 1.083 | 1.099 |
|      | 50                 | 1.064                     | 1.068 | 1.073 |
|      | 100                | 1.063                     | 1.065 | 1.067 |
|      | 150                | 1.063                     | 1.064 | 1.065 |
| 两相接地 | 20                 | 1.431                     | 1.450 | 1.470 |
|      | 50                 | 1.431                     | 1.447 | 1.464 |
|      | 100                | 1.431                     | 1.447 | 1.463 |
|      | 150                | 1.431                     | 1.447 | 1.462 |

$$i_{SS,MAX}^+ = 1.099, i_{SS,MIN}^+ = 1.063 \text{ 和 } i_{ST,MAX}^+ = 1.470, i_{ST,MIN}^+ = 1.431。$$

表 2 10 MW 光伏源取值

Table 2 Value of 10 MW PV power

| 故障类型 | 中性点电阻 $R_g/\Omega$ | $I_{S,PU}$ 在不同故障位置的取值/标么值 |       |       |
|------|--------------------|---------------------------|-------|-------|
|      |                    | 线路首端                      | 线路中点  | 线路末端  |
| 单相接地 | 20                 | 1.109                     | 1.125 | 1.141 |
|      | 50                 | 1.105                     | 1.109 | 1.114 |
|      | 100                | 1.104                     | 1.106 | 1.108 |
|      | 150                | 1.104                     | 1.105 | 1.106 |
| 两相接地 | 20                 | 1.474                     | 1.484 | 1.491 |
|      | 50                 | 1.473                     | 1.482 | 1.488 |
|      | 100                | 1.473                     | 1.482 | 1.487 |
|      | 150                | 1.473                     | 1.482 | 1.487 |

$$i_{SS,MAX}^+ = 1.141, i_{SS,MIN}^+ = 1.104 \text{ 和 } i_{ST,MAX}^+ = 1.491, i_{ST,MIN}^+ = 1.473。$$

表 3 5 MW 光伏源取值

Table 3 Value of 5 MW PV power

| 故障类型 | 中性点电阻 $R_g/\Omega$ | $I_{S,PU}$ 在不同故障位置的取值/标么值 |       |       |
|------|--------------------|---------------------------|-------|-------|
|      |                    | 线路首端                      | 线路中点  | 线路末端  |
| 单相接地 | 20                 | 1.131                     | 1.148 | 1.164 |
|      | 50                 | 1.127                     | 1.131 | 1.137 |
|      | 100                | 1.126                     | 1.128 | 1.130 |
|      | 150                | 1.126                     | 1.127 | 1.128 |
| 两相接地 | 20                 | 1.490                     | 1.494 | 1.499 |
|      | 50                 | 1.490                     | 1.493 | 1.496 |
|      | 100                | 1.490                     | 1.492 | 1.495 |
|      | 150                | 1.490                     | 1.492 | 1.495 |

$$i_{SS,MAX}^+ = 1.164, i_{SS,MIN}^+ = 1.126 \text{ 和 } i_{ST,MAX}^+ = 1.499, i_{ST,MIN}^+ = 1.490。$$

$I_s^+$  本身是相量, 为了工程算法简便, 此处取标

量即可,由此带来的计算误差通过乘以一个校准系数来弥补,校准系数一般取 1.06。

$R_g$  最小取  $20 \Omega$ ,可以保证接地电流最大不超过  $1000 \text{ A}$ ,从而保障人身安全<sup>[21]</sup>。

从表 1—表 3 中可以看到在两相接地时光伏电源输出电流的幅值较单相接地时要高,这是因为两相接地时光伏电源端压跌落幅度较大。

同时,在逆变器 LVRT 控制策略的作用下,无论发生单相还是两相接地时,光伏逆变电源的输出电流都被控制在逆变器允许值(1.5 倍额定电流)<sup>[4]</sup>之内。对比表 1—表 3 还可以得知,大容量 PV 电源比小容量 PV 电源在相同故障条件下的输出电流标幺值更小,这说明大容量 PV 电源在电网发生故障电压跌落时,对电网的无功支撑能力更强,即 LVRT 能力更强。

### 3 算例验证

#### 3.1 算例参数及结构

以图 1 所示典型网络做算例分析,光伏电站容量为  $20 \text{ MW}$ ,其他系统参数如下。

1) 线路参数:所有线路正负序单位参数相同,零序单位参数为正负序的 3 倍。 $110 \text{ kV}$  线路长  $14 \text{ km}$ ,使用 LGJ- $2 \times 400$ ,正负序阻抗  $0.08 + j0.414 \Omega/\text{km}$ , $35 \text{ kV}$  线路长  $10 \text{ km}$ ,使用 LGJ-240,正负序阻抗  $0.132 + j0.386 \Omega/\text{km}$ 。

2) 变压器参数: T1 各次绕组短路阻抗分别为  $12.25\%$ ,  $0$ ,  $14.75\%$ , T2 各次绕组短路阻抗分别为  $10.75\%$ ,  $0$ ,  $6.75\%$ , T3 的短路阻抗为  $6\%$ 。

3)  $20 \text{ MW}$  光伏站由 2 条汇集线组成,每条汇集线电缆长度为  $3 \text{ km}$ ,型号 YJV22- $3 \times 95 \text{ mm}$ ,正负序阻抗  $0.196 + j0.129 \Omega/\text{km}$ 。

#### 3.2 零序电流计算结果

在图 1 所示的算例中进行零序电流计算,在 K 点分别发生单相接地和两相接地故障,将提出的工程算法计算所得的结果与采用交互迭代算法所得的结果进行了对比。两种方法的计算结果与对比结果如下所述。

1) K 点发生单相接地故障时,本文所提工程算法计算结果与迭代算法计算结果对比如表 4 所示。

通过表 4 对比结果可知,当发生单相接地短路故障时,本文所提工程算法所得的零序电流计算结果与迭代算法结果非常接近,最大误差不超过  $4\%$ ,完全可以满足短路计算、保护整定等工程应用要求。

2) K 点发生两相接地故障时,本文所提工程算法计算结果与迭代算法计算结果对比如表 5 所示。

表 4 单相接地零序电流计算结果

Table 4 Zero-sequence current of single phase to ground fault

| 中性点电阻 $R_g/\Omega$ | 方法 | $ I_0 $ 零序电流/A |        |        |
|--------------------|----|----------------|--------|--------|
|                    |    | 线路首端           | 线路中点   | 线路末端   |
| 20                 | 工程 | 347.84         | 321.89 | 296.90 |
|                    | 迭代 | 347.06         | 327.58 | 307.67 |
| 50                 | 工程 | 142.59         | 140.47 | 138.19 |
|                    | 迭代 | 142.06         | 142.59 | 142.68 |
| 100                | 工程 | 71.58          | 71.67  | 71.77  |
|                    | 迭代 | 71.28          | 72.68  | 74.00  |
| 150                | 工程 | 47.76          | 48.05  | 48.36  |
|                    | 迭代 | 47.55          | 48.71  | 49.84  |

表 5 两相接地零序电流计算结果

Table 5 Zero-sequence current of double phase to ground fault

| 中性点电阻 $R_g/\Omega$ | 方法 | $ I_0 $ 零序电流/A |        |        |
|--------------------|----|----------------|--------|--------|
|                    |    | 线路首端           | 线路中点   | 线路末端   |
| 20                 | 工程 | 178.01         | 171.79 | 165.23 |
|                    | 迭代 | 178.45         | 176.11 | 172.86 |
| 50                 | 工程 | 71.78          | 71.92  | 72.10  |
|                    | 迭代 | 71.86          | 73.58  | 75.23  |
| 100                | 工程 | 35.93          | 36.37  | 36.86  |
|                    | 迭代 | 35.96          | 37.18  | 38.42  |
| 150                | 工程 | 23.96          | 24.33  | 24.74  |
|                    | 迭代 | 23.98          | 24.86  | 25.77  |

通过表 5 对比结果可知,当发生两相接地短路故障时,误差较单相短路略大一点,但仍然不超过  $5\%$ ,完全可以满足工程应用的要求。

## 4 结论

中性点经电阻接地的并网光伏电站的零序电流计算对于光伏电源的发展具有重要意义。本文针对电阻接地并网光伏电站的故障特性,提出了一种适用于该类系统的零序电流工程实用算法。该计算方法的主要特点是既考虑了光伏逆变器的 LVRT 控制策略,又可以满足工程应用简单直接的要求。

1) 简单:有待计算的并网光伏电站,即可简单地确定各阻抗参数,通过查表法可以简单地确定光伏电流源的取值。

2) 直接:可以直接通过一个公式计算出零序电流结果,省去了求解非线性方程组的大量迭代过程。算例结果验证了该方法的实用性和有效性。

### 参考文献

- [1] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 1-4.  
ZHANG Baohui. On connection of distributed energy

- generation to power system[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2007, 27(12): 1-4.
- [2] 瞿继平, 吴兴全, 闫凯, 等. 光伏电站若电源特性对送出线路继电保护的影响[J]. *电力自动化设备*, 2015, 35(5): 146-151.
- QU Jiping, WU Xingquan, YAN Kai, et al. Influence of PV station weak power feature on relay protection of outgoing transmission line[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2015, 35(5): 146-151.
- [3] 刘瑞阳, 薛云灿, 冯宝玥, 等. 光伏发电系统模糊分段变步长算法最大功率点跟踪策略[J]. *热力发电*, 2016, 45(5): 48-53.
- LIU Ruiyang, XUE Yuncan, FENG Baoyue, et al. A new control strategy for MPPT in photovoltaic system based on fuzzy and variable step size algorithm[J]. *Thermal Power Generation*, 2016, 45(5): 48-53.
- [4] 郑伟, 陈仕彬, 梁福波, 等. 基于 PSO-PSA 的光伏系统最大功率点跟踪技术[J]. *热力发电*, 2018, 47(2): 78-84.
- ZHENG Wei, CHEN Shibin, LIANG Fubo, et al. Maximum power point tracking technology based on hybrid algorithm of PSO and PSA for photovoltaic systems[J]. *Thermal Power Generation*, 2018, 47(2): 78-84.
- [5] 王鲍雅琼, 陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(12): 146-154.
- WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(12): 146-154.
- [6] 王岩, 魏林君, 高峰, 等. 光伏电站经柔性直流集电送出系统的低电压穿越协调控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(14): 70-78.
- WANG Yan, WEI Linjun, GAO Feng, et al. Coordinated control strategy between large-scale photovoltaic power station and VSC-HVDC for low voltage ride-through operation[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(14): 70-78.
- [7] 闫凯, 张保会, 瞿继平, 等. 光伏发电系统暂态建模与等值[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(1): 1-8.
- YAN Kai, ZHANG Baohui, QU Jiping, et al. Photovoltaic power system transient modeling and equivalents[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(1): 1-8.
- [8] 王秀莲, 胡广, 毕大强. 光伏低电压穿越期间无功补偿对差动保护灵敏度的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(4): 51-56.
- WANG Xiulian, HU Guang, BI Daqiang. Impact analysis of reactive power compensation on sensitivity of differential protection during the low voltage ride-through of photovoltaic systems[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(4): 51-56.
- [9] 刘素梅, 毕天姝, 王晓阳, 等. 具有不对称故障穿越能力逆变型新能源电源故障电流特性[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(3): 66-73.
- LIU Sumei, BI Tianshu, WANG Xiaoyang, et al. Fault current characteristics of inverter interfaced renewable energy generators with asymmetrical fault ride-through capability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(3): 66-73.
- [10] 李育强, 王志文, 王维庆, 等. 具备 LVRT 能力的光伏接入配网对重合闸的影响及对策[J]. *电力系统保护与控制*, 2016, 44(15): 61-67.
- LI Yuqiang, WANG Zhiwen, WANG Weiqing, et al. Influence of PV with LVRT capability access to distribution network on automatic reclosing and its countermeasures[J]. *Power System Protection and Control*, 2016, 44(15): 61-67.
- [11] 张海玉, 刘闯, 晁勤, 等. 具有 LVRT 能力的并网光伏系统继电保护问题研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(3): 53-60.
- ZHANG Haiyu, LIU Chuang, CHAO Qin, et al. Research on relay protection issues of grid-connected photovoltaic system with LVRT ability[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(3): 53-60.
- [12] GHORBANI A, EBRAHIMI S Y, GHORBANI M. Active power based distance protection scheme in the presence of series compensators[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2017, 2(2): 57-69. DOI: 10.1186/s41601-017-0034-4.
- [13] 王守相, 江兴月, 王成山. 含分布式电源的配电网故障分析叠加法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(5): 38-42.
- WANG Shouxiang, JIANG Xingyue, WANG Chengshan. A superposition method of fault analysis for distribution systems containing distributed generations[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(5): 38-42.
- [14] BARAN M E, ISMAIL E M. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. *IEEE*

- Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1757-1764.
- [15] PRADHAN A K, GEZA J. Adaptive distance relay setting for lines connecting wind farms[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 206-213.
- [16] 孙景钉, 李永丽, 李胜伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.  
SUN Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.
- [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] 吴争荣, 王钢, 李海锋, 等. 含分布式电源配电网的相间短路故障分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 130-136.  
WU Zhengrong, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Analysis on the distribution network with distributed generators under phase-to-phase short-circuit faults[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 130-136.
- [19] 潘国清, 曾德辉, 王钢, 等. 含 PQ 控制逆变型分布式电源的配电网故障分析方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 555-561.  
PAN Guoqing, ZENG Dehui, WANG Gang, et al. Method of fault analysis on distribution network with inverter interfaced distributed generations based on PQ control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 555-561.
- [20] 周念成, 叶玲, 王强钢, 等. 含负序电流注入的逆变型分布式电源电网不对称短路计算[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 41-49.  
ZHOU Niancheng, YE Ling, WANG Qianggang, et al. Asymmetric short-circuit current calculation for inverter interfaced distributed generators with negative sequence current injection integrated in power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 41-49.
- [21] 国家电网公司. 光伏电站接入电网技术规定: Q-GDW 617—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.  
State Grid Corporation of China. Technical rule for photovoltaic power station connected to power grid: Q-GDW 617—2011[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2011.
- [22] WANG Q, ZHOU N, YE L. Fault analysis for distribution networks with current-controlled three-phase inverter interfaced distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1532-1542.
- [23] 李朝晖, 段绍辉, 郑志铿. 中性点小电阻接地配电网单相接地故障人身安全性试验研究[J]. 电力自动化设备, 2001, 21(9): 40-42.  
LI Zhaohui, DUAN Shaohui, ZHENG Zhikeng. Research on human safety test under single phase grounding fault of distribution network with neutral point resistor grounding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 40-42.

收稿日期: 2017-07-26; 修回日期: 2017-11-02

作者简介:

吴兴全(1970—), 男, 学士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护、通信及自动化研究; E-mail: wxq0703@126.com

吴丽(1984—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动装置研究; E-mail: 70413@163.com

李召兄(1984—), 女, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统一次规划设计及电网运行分析. E-mail: 3590005@qq.com

(编辑 张爱琴)