

适用于含新能源逆变电源网络的全时域 短路电流计算方法

匡晓云¹, 方煜², 关红兵¹, 李捷³, 贾科², 毕天姝²

(1. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510700;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

3. 中国南方电网电力调度控制中心, 广东 广州 510700)

摘要:含新能源逆变电源在故障后无恒定电动势,因而传统交流网络短路电流计算所用的内电动势-阻抗方法不再适用。为解决该问题,提出了一种包含新能源逆变电源故障稳态和暂态2种时间尺度下的全时域短路电流计算方法。故障稳态计算中结合逆变电源的控制策略,将逆变电源视为非线性电流源,充分反映了逆变电源短路后的故障特性。故障暂态计算中基于稳态短路电流结果,利用由控制系统推演出的暂态微分方程,求解出暂态过程中的电流表达式。最后将计算值和仿真结果、录波结果进行对比,验证了该方法的可行性。

关键词:新能源电源;短路电流;稳态电流;暂态电流

中图分类号:TM 74

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202003012

0 引言

电力系统短路电流计算为电网的保护整定以及电气设备的选取提供了依据。然而,随着新能源电源的大规模接入,传统短路电流计算方法存在适应性问题^[1]。不同于同步机电源,含光伏电源和永磁直驱风力发电机等新能源逆变电源网络中包含大量电力电子装置,其故障特性受控制系统的直接影响^[2]。表现在外特性上为故障前后次暂态电动势和阻抗值不恒定^[3],逆变器提供的短路电流与端电压的关系为非线性关系等^[4]。因此,基于次暂态电动势-阻抗的常规短路电流计算方法无法适用于含新能源逆变电源网络,而电网中新能源电源渗透率的不断提高则要求提出能够适用于含新能源逆变电源网络的短路电流计算方法。

为了研究含新能源逆变电源网络电流保护的整定计算,文献[5]分析了单逆变电源网络的短路电流情况,将逆变电源外的网络进行等效化简,为逆变电源短路电流提供了简单快捷的计算方法。为将研究对象扩展至多逆变电源网络且不显著增加计算的复杂程度,近似的思想被广泛采用。文献[6]认为故障前后逆变器出口的电动势保持恒定,但没有充分考虑逆变电源与同步机电源的根本区别。文献[7]提

出了基于等效电流源的分布式电源配电网短路电流计算方法,故障后逆变电源的输出电流恒定,为逆变器允许通过的电流上限,但这种方法在精度上存在明显不足。在此基础上,文献[8]提出了考虑低电压穿越的逆变电源计算方法,该方法考虑了并网点电压跌落情况对电流的影响,但对在具有非线性特性的逆变电源网络中采用基于叠加原理的故障分量网络是否可行没有作出解释。在考虑非线性特性的前提下,文献[9]假设逆变电源并网点电压为待求未知量,列写电压非线性方程,通过求解方程获得并网点电压和网络状态。然而,这种方法仅适用于网络中只包含1个逆变电源的特殊情况,如果逆变电源数量较多,各并网点电压的耦合会造成高维非线性方程列写和求解的困难。文献[10]提出一种采用电流源模型并结合迭代修正思想的算法,这种算法可以较好地求解对称故障下的稳态短路电流。但是认为逆变电源仅输出正序短路电流,从而采用阻抗等效负序网络的做法,限制了这种方法的应用场景。

目前所研究的含新能源逆变电源网络的短路电流计算方法大多只考虑逆变电源处于故障稳态阶段的理想情况。事实上,尽管逆变电源的暂态过渡过程非常短暂,通常只持续几到几十毫秒的时间^[11],但需要注意的是快速保护的发展对短时间尺度下逆变电源短路电流计算的要求日益提高。对于一些新型快速交流保护方案,如波形相似度保护^[12],保护出口时间甚至短至几毫秒。在这段时间内,逆变电源可能处于暂态运行状态中,利用故障后稳态的电流进行分析存在严重的不合理性。

关于暂态电流的求解,国外有学者做过相关研

收稿日期:2019-04-01;修回日期:2020-01-07

基金项目:南方电网公司科技项目(35 kV及以下系列保护测控装置芯片化关键技术研究)(SEPRI-K185024)

Project supported by the Science and Technology Project of China Southern Power Grid (Key Technologies of Chip based Protection and Control Devices with 35 kV and Below)(SEPRI-K185024)

究。文献[11]将故障后的暂态过程划分为次暂态和暂态2个过程,认为在次暂态过程中逆变电源的内电动势保持不变;对于暂态过程的分析,考虑在一个步长的微小时间段内,同步发电机电流的电流和逆变电源的电动势按指数规律变化。同步发电机电流和逆变电源部分采用不同的计算步长进行求解,其步长的选取影响着结果精度。整个计算需要占用大量的资源和时间,并且该方法不适用于多逆变电源网络和电流控制型电源。

本文将故障后逆变器的短路电流从时域上分为稳态和暂态两部分。对于稳态电流的求解,所提方法充分考虑到含新能源逆变电源网络的非线性特性、换流器故障穿越策略以及各电源间的交互影响。对于暂态电流的求解,提出了一种基于故障前后稳态电流数值并利用时域微分方程求解的算法。利用MATLAB编写上述算法,将计算结果与PSCAD/EMTDC仿真结果进行对比。对比结果验证了该算法的可行性和准确性。

1 同步发电机电源与新能源逆变电源的故障特性与等效模型

含新能源逆变电源网络的特殊性在于电源类型和故障特性的多样化。为准确计算网络状态,首先需要在所研究的时间尺度下建立各电源的精确化模型,并分析各电源的故障特性。

1.1 新能源逆变电源

正常运行时,新能源逆变电源按指定的功率运行。为减小网络损耗,新能源逆变电源通常以单位功率因数状态运行^[13]。故障发生后,新能源逆变电源的端电压偏离正常值,根据故障类型的不同可能产生负序分量^[14]。利用 dq 坐标系下逆变器并网点处的电压相量 $\mathbf{U}_{dq}$ 和电流相量 $\mathbf{I}_{dq}$,可得换流器的功率方程:

$$p + jq = 3\mathbf{U}_{dq} \hat{\mathbf{I}}_{dq}^*/2 \quad (1)$$

其中, $\hat{\mathbf{I}}_{dq}$ 为 $\mathbf{I}_{dq}$ 的共轭; p 为换流器的有功功率; q 为换流器的无功功率。采用等幅值坐标变换,式(1)中引入功率平衡系数3/2。

由文献[15]可知,采用正负序分量时,有功功率和无功功率均分别包含平均分量及正弦、余弦二倍频分量: $p_0, p_s \sin(2\omega_1 t), p_c \cos(2\omega_1 t)$ 和 $q_0, q_s \sin(2\omega_1 t), q_c \cos(2\omega_1 t)$ 。故障后的控制目标决定了功率分量的选取原则。实际中常采用的控制策略包括抑制负序电流、抑制有功功率波动以及抑制无功功率波动。各控制目标下电流环的指令值表达式为^[16]:

$$\begin{bmatrix} i_d^+ \\ i_q^+ \\ i_d^- \\ i_q^- \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} u_d^+ & u_q^+ \\ u_q^+ & -u_d^+ \\ -Ku_d^- & Ku_q^- \\ -Ku_q^- & -Ku_d^- \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_0 \\ M \\ q_0 \\ N \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, u_d^+, u_q^+ 和 u_d^-, u_q^- 分别为逆变器并网点处 d, q 轴电压的正序和负序分量; i_d^+, i_q^+ 和 i_d^-, i_q^- 分别为逆变器并网点处 d, q 轴电流的正序和负序分量; $M = (u_d^+)^2 + (u_q^+)^2 - K[(u_d^-)^2 + (u_q^-)^2]$, $N = (u_d^+)^2 + (u_q^+)^2 + K[(u_d^-)^2 + (u_q^-)^2]$, K 为表征控制策略的整数变量,在抑制负序电流、抑制有功功率波动以及抑制无功功率波动时分别取0、1和-1。

dq 坐标系下电流环中正、负序电流指令值的表达式为:

$$\begin{cases} I_{dq}^+ = i_d^+ + ji_q^+ = \frac{2}{3} (u_d^+ + ju_q^+) \left(\frac{p_0}{M} - j \frac{q_0}{N} \right) \\ I_{dq}^- = i_d^- + ji_q^- = -\frac{2}{3} K (u_d^- + ju_q^-) \left(\frac{p_0}{M} + j \frac{q_0}{N} \right) \end{cases} \quad (3)$$

再对式(3)进行坐标变换,即可得到三相静止坐标系下的电流表达式。

虽然上述分析均在不对称短路故障条件下推导,但所提方法和所得结论均适用于对称故障下的分析过程,此时电压不平衡度为0。由此可见,换流器的控制策略在很大程度上影响输出电流特性。当精确研究短路电流的计算方法时,控制策略的选取可能导致无法忽略负序电流。

上述分析过程以换流器控制系统可以实现电流指令值准确跟踪为前提。实际上,故障后双环控制系统中的比例积分(PI)环节在暂态调节过程中不可避免地出现滞后现象,反映在电流上为电流内环的实际电流值滞后于电流指令值。因此为准确刻画极短时间尺度下逆变电源短路电流的变化情况,需对这一暂态过程进行分析。

由于双环控制环节中正负序电气量不存在耦合关系,以正序电气量为例进行分析,分析方法同样适用于负序电气量。

换流器的电压方程为:

$$\begin{cases} v_d = -L \frac{di_d}{dt} - Ri_d + \omega Li_q + u_d \\ v_q = -L \frac{di_q}{dt} - Ri_q - \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (4)$$

其中, u_d, u_q 分别为逆变器并网点电压的 d, q 轴分量; v_d, v_q 分别为逆变器出口电压的 d, q 轴分量; i_d, i_q 分别为逆变器并网点电流的 d, q 轴分量,规定流入逆变器的方向为电流正方向; R 和 L 分别为逆变器端口滤波器的电阻值和电感值; ω 为工频角速度,取 100π rad/s。

电流内环的控制方程为:

$$\begin{cases} v_d = -\left[k_{ip}(i_d^* - i_d) + k_{ii} \int (i_d^* - i_d) dt \right] + \omega Li_q + u_d \\ v_q = -\left[k_{ip}(i_q^* - i_q) + k_{ii} \int (i_q^* - i_q) dt \right] - \omega Li_d + u_q \end{cases} \quad (5)$$

其中, k_{ip} 和 k_{ii} 分别为电流环的比例和积分系数; i_d^*, i_q^*

分别为 d 、 q 轴逆变器并网点处的电流参考值。

消去两组方程中的电压,并对公式进行微分,可得到关于电流的二阶微分方程:

$$\begin{cases} \frac{d^2 i_d}{dt^2} + \frac{R + k_{ip}}{L} \frac{di_d}{dt} + \frac{k_{ii}}{L} i_d = \frac{k_{ip}}{L} \frac{di_d^*}{dt} + \frac{k_{ii}}{L} i_d^* \\ \frac{d^2 i_q}{dt^2} + \frac{R + k_{ip}}{L} \frac{di_q}{dt} + \frac{k_{ii}}{L} i_q = \frac{k_{ip}}{L} \frac{di_q^*}{dt} + \frac{k_{ii}}{L} i_q^* \end{cases} \quad (6)$$

式(6)的特征方程为:

$$\lambda^2 + \frac{R + k_{ip}}{L} \lambda + \frac{k_{ii}}{L} = 0 \quad (7)$$

其中, λ 为特征根。解得:

$$\lambda_{1,2} = \frac{-(R + k_{ip}) \pm \sqrt{(R + k_{ip})^2 - 4k_{ii}L}}{2L} \quad (8)$$

通常情况下,为了实现电流的快速跟踪,控制系统的参数应满足 $k_{ii}/k_{ip} \approx R/L$ 和 $k_{ip}/L \approx 1/\tau_i$, τ_i 为整个控制的闭环时间常数。其中 $1/\tau_i$ 足够大但需要小于PWM载波频率的 $1/10^{[17]}$,则式(8)根式中的算式大于0,系统处于过阻尼状态。二阶微分方程解的形式为:

$$i_d(t) = A_1 e^{-R(t-t_0)/L} + A_2 e^{-(t-t_0)/\tau_i} + A_3 \quad (9)$$

其中, A_1 — A_3 为待定系数; t_0 为故障发生时刻。

对于式(6),在故障前后,控制系统的电流指令值 i_d^* 发生了突变,由 $i_d^*(t_0^-)$ 变为 $i_d^*(t_0^+)$ 。因此, $di_d^*/dt = (i_d^*(t_0^+) - i_d^*(t_0^-))\delta(t - t_0)$,其中 $\delta(t)$ 为单位冲激函数。式(6)等号右边第一项包含了冲激函数,根据等式左右冲激函数平衡原理可知,左端二阶导数项 $d^2 i_d/dt^2$ 应含有冲激项 $[(k_{ip}/L)(di_d^*/dt)]$ 以保持与右端对应,因而一阶导数项将产生阶跃值;而一阶导数项不含 $\delta(t)$,则实际电流 i_d 在故障前后无跃变(若一阶导数项中含 $\delta(t)$,则二阶导数项中出现 $d\delta(t)/dt$,破坏左右两端平衡)。故 $d^2 i_d/dt^2 = (k_{ip}/L)(i_d^*(t_0^+) - i_d^*(t_0^-))\delta(t - t_0) + g(t)$,其中 $g(t)$ 为某一非奇异函数,在 t_0 到 t_0^+ 上的积分为0。由此可得微分方程的初始条件为:

$$\begin{cases} \frac{di_d(t_0^+)}{dt} - \frac{di_d(t_0^-)}{dt} = \int_{t_0^-}^{t_0^+} \left[\frac{k_{ip}}{L} (i_d^*(t_0^+) - i_d^*(t_0^-)) \delta(t - t_0) + g(t) \right] dt = \frac{k_{ip}}{L} [i_d^*(t_0^+) - i_d^*(t_0^-)] \\ i_d(t_0^+) = i_d(t_0^-), \quad \frac{di_d(t_0^-)}{dt} = 0, \quad i_d(t_0^-) = i_d^*(t_0^-) \end{cases} \quad (10)$$

结合故障前后电流指令值求解式(6),特征根如式(8)所示,电流表达式为:

$$i_d(t) = A_1 e^{-R(t-t_0)/L} + A_2 e^{-(t-t_0)/\tau_i} + A_3 \quad t \geq t_0 \quad (11)$$

$$\begin{bmatrix} A_1 \\ A_2 \\ A_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ -k_{ip}/L & k_{ip}/L \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^*(t_0^-) \\ i_d^*(t_0^+) \end{bmatrix}$$

1.2 同步电源

目前关于同步电源的电磁暂态过程的研究相对成熟。一般将故障后同步发电机的状态分为次暂态、暂态及稳态3个过程。对于所要研究的保护整定和电气设备选取所对应的运行状态,同步发电机一直处于次暂态过程。本文采用次暂态电动势和次暂态电抗串联的通用模型表示同步发电机电源。需要指出的是,对于次暂态过程而言,同步发电机是一个线性电源。对于线性电源可以采用诺顿等效原理将串联的同步发电机模型转变为有伴电流源。其中,电流源的电抗为串联模型中的次暂态电抗,电流源的电流为次暂态电动势与次暂态电抗的比值 E''/x 。

2 短路电流计算方法

2.1 新能源逆变电源处于稳态后的电流计算方法

至此,含新能源电源网络中的电源均可以利用无伴电流源或有伴电流源进行等效。如何在已知电源和网络结构的情况下,求解整个网络的状态是接下来需要解决的问题。

首先分析三相短路故障场景,以此为例对含新能源逆变电源的网络应用叠加原理进行网络分解的不可行性进行解释。传统同步电源网络在发生三相短路故障后可以将其分解为正常运行网络和故障分量网络。对于故障分量网络,其节点电压方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_f \\ \vdots \\ \Delta U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1f} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{f1} & \cdots & Z_{ff} & \cdots & Z_{fn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nf} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ -I_f \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

其中, f 为故障点; n 为节点总数;阻抗 Z_{jk} ($j, k = 1, 2, \dots, n$ 且 $j \neq k$)为节点阻抗矩阵中节点 j 和节点 k 间的互阻抗; Z_{jj} 为节点 j 的自阻抗; ΔU_j 为节点 j 的电压偏差量; I_f 为注入故障点的电流相量。

考虑到在故障分量网络中存在:

$$\Delta U_f = -U_{f|0|} + I_f z_f \quad (13)$$

其中, z_f 为故障点处过渡阻抗; $U_{f|0|}$ 为故障点处正常电压相量。则注入故障点处的电流相量为:

$$I_f = U_{f|0|} / (Z_{ff} + z_f) \quad (14)$$

由于故障网络仅在故障点处含有激励,且网络各支路的相互联系可以通过 Z_{ff} 表征,所以该方法仅依赖式(14)即可实现非迭代计算。值得指出的是,同步发电机电源在故障发生后的次暂态过程中内电动势保持恒定。

电源、输配电网络的伏安特性为线性是利用叠加原理进行网络分解的前提条件。1.1节中分析了新能源电源的故障特性,故障后逆变电源在稳态过程中对外表现为压控电流源的特征,即此压控电流

源的输出电流和并网点电压之间为非线性关系。即便可以利用叠加原理进行网络分解,故障分量网络中也会出现新能源电源^[18],并且该电源随并网点电压的变化而变化,无法利用恒定的电压源和电流源表示。

叠加原理存在适用性问题,不能简化求解过程。因此考虑从分解前的全网络入手求解,列写整个网络的节点电压方程:

$$\begin{bmatrix} U_1 \\ \vdots \\ U_m \\ \vdots \\ U_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1m} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{m1} & \cdots & Z_{mm} & \cdots & Z_{mn} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nm} & \cdots & Z_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_m \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (15)$$

其中, m 为测量节点; U_j 为节点 j 电压相量; I_j 为注入节点 j 的电流相量。

对于含新能源逆变电源的网络,式(15)等号右边的注入电流同时由同步发电机电源和逆变电源所提供。对于同步发电机电源,注入电流恒定,为次暂态电动势和次暂态电抗经过诺顿等值后的电流源电流;对于逆变电源,为某一状态下的实际输出电流,其电流值由并网点电压决定(由式(3)计算得到)。由此计算出网络各节点电压相量,用计算出的节点电压相量求取逆变电源的输出电流,并更新式(15)中的注入电流列向量。稳态电流计算流程如附录中图A1所示,按此方法进行迭代计算,直至网络中各节点电压收敛。

在已知网络各节点准确电压的前提下,即可计算各条线路上的短路电流。与新能源电源直接相连线路的电流可以根据式(3)计算,不直接与新能源电源相连线路的短路电流为:

$$I_{jk} = (U_j - U_k) / z_{jk} \quad (16)$$

其中, z_{jk} 为节点 j 、 k 间的线路阻抗; I_{jk} 为节点 j 、 k 间的线路电流相量。

将故障场景扩展到不对称短路。此时,正负序或正负零序网络的电压、电流存在联系。各序网之间的连接情况与系统接地情况及由故障类型决定的故障点边界条件有关。对于仅含同步发电机电源的网络,通常将无源的负序(或负序及零序)网络等效为一个阻抗或导纳连接于正序网络中的故障点处。

对于包含非线性新能源电源在内的整个正序有源二端网络(端子为故障点和零电位点)而言,诺顿等值的物理意义不明确。只要新能源电源的控制策略不是抑制负序电流,则负序二端网络中也会包含非线性电源。该网络同样面临无法正确等效的问题。

采用与三相短路故障计算相似的思路。由于正负零序网络不存在耦合关系,不考虑故障边界条件时形成的节点导纳矩阵为:

$$\begin{bmatrix} I_n^P \\ I_n^N \\ I_n^Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{n \times n}^P & 0 & 0 \\ 0 & Y_{n \times n}^N & 0 \\ 0 & 0 & Y_{n \times n}^Z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_n^P \\ U_n^N \\ U_n^Z \end{bmatrix} \quad (17)$$

其中, U_n^P 、 U_n^N 、 U_n^Z 分别为正、负、零序节点电压相量矩阵; I_n^P 、 I_n^N 、 I_n^Z 分别为正、负、零序注入节点电流相量矩阵; $Y_{n \times n}^P$ 、 $Y_{n \times n}^N$ 、 $Y_{n \times n}^Z$ 分别为正、负、零序节点导纳矩阵。

各序网络通过包含电气关系的故障点联系在一起,为体现这种连接关系,在式(17)所示的各序网络中添加故障点和零电势点。根据故障类型调整各序间故障点和零电势的连接方式,并且将正序零电势点消去(接地以消除节点导纳的奇异性),可得维数为 $3n+5$ 的节点电压方程:

$$\begin{bmatrix} U_{n+1}^P \\ U_{n+2}^N \\ U_{n+2}^Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{(n+1)(n+1)}^{PP} & Y_{(n+1)(n+2)}^{PN} & Y_{(n+1)(n+2)}^{PZ} \\ Y_{(n+2)(n+1)}^{NP} & Y_{(n+2)(n+2)}^{NN} & Y_{(n+2)(n+2)}^{NZ} \\ Y_{(n+2)(n+1)}^{ZP} & Y_{(n+2)(n+2)}^{ZN} & Y_{(n+2)(n+2)}^{ZZ} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I_{n+1}^P \\ I_{n+2}^N \\ I_{n+2}^Z \end{bmatrix} \quad (18)$$

其中, $Y^{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta \in \{P, N, Z\}$ 且 $\alpha \neq \beta$)为不同序别间的节点导纳矩阵; $Y^{\alpha\alpha}$ 为相同序别节点导纳矩阵。

对于式(18)中的分块节点导纳矩阵而言,非主对角元分块的稀疏性极高。如对于分块矩阵 $Y_{(n+1)(n+2)}^{PN}$,正序零电势点和负序故障点对应的元素为正无穷大,其他元素均为0。

形成网络节点电压方程后,接下来的做法与三相短路故障类似。假设各节点电压为初始值(可以采用潮流计算的结果),求出新能源电源输出的各序电流。同步发电机电源只充当网络中的正序注入电流元件,因而只在 I_{n+1}^P 中以恒定值出现,而新能源逆变电源电流可能同时出现在 I_{n+1}^N 中。如图A1所示,由 k 次的节点电压求出 k 次的节点注入电流,结合节点导纳矩阵,计算出节点电压作为 $k+1$ 次的状态,如此迭代直至各节点电压收敛到指定精度。

这种方法矩阵规模较大,但在迭代过程中节点导纳矩阵并不发生变化,因而导纳矩阵求逆运算实际上只需进行一次。在程序实现过程中,可以利用因子表来加速矩阵逆运算。

在求得各节点电压后,根据式(3)计算新能源电源输出线路上的故障电流,并利用各序电压和阻抗计算线路中短路电流各序分量,合成可得总电流,即:

$$I_{jk}^\alpha = (U_j^\alpha - U_k^\alpha) / z_{jk}^\alpha \quad (19)$$

其中, I_{jk}^α 为节点 j 、 k 间线路电流相量的各序分量; U_j^α 、 U_k^α 分别为节点 j 、 k 电压相量的各序分量; z_{jk}^α 为节点 j 、 k 间线路的各序阻抗。

2.2 新能源逆变电源处于暂态过程中的电流计算方法

以上算法本质上是基于相量的节点电压方程,

因而求得的电压、电流均为周期分量的有效值。需要注意的是,新能源逆变电源的输出电流与并网点电压之间的关系采用故障后的稳态表达式。为了全面描述故障后新能源逆变电源输出电流的变化情况,有必要对其进行暂态计算。

由式(6)可知,新能源逆变电源的暂态调节过程相当于电流由一种稳态到另一种稳态,且满足二阶微分方程的过渡过程。由于故障后新能源逆变电源的暂态调节并不会改变稳态下的控制策略和控制目标,因此故障后的稳态电流依旧是2.1节中计算出的结果。将故障前正常运行的电流值和故障后稳态运行的电流指令值代入式(8)和式(11),即可求出暂态调节过程中新能源逆变电源的输出电流。

基于上述分析,可以求解出故障后新能源逆变电源的输出电流时域表达式。

3 仿真验证

为验证上述计算方法的可行性和正确性,在PSCAD/EMTDC中搭建如图1所示的典型含新能源逆变电源网络模型。图中, E_s 为系统电势; z_s 为系统电抗; L_1 — L_3 为负荷;DG₁、DG₂为分布式电源。所提短路电流求解方法通过MATLAB程序的计算结果和PSCAD/EMTDC的仿真数据进行对比验证。

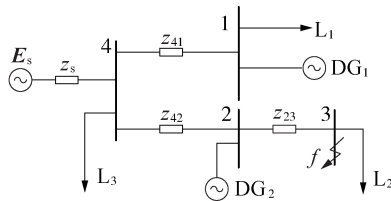


图1 典型含新能源逆变电源电网拓扑图

Fig.1 Network topology with typical inverter-interfaced renewable energy source

测试系统电压等级为10 kV,频率为50 Hz。交流电源以理想平衡节点表示,故障后采用次暂态模型等效。2个光伏发电单元额定容量均为1 MW,交流侧额定电压为0.38 kV,经0.38 kV/10 kV(Δ/Y)变压器接入交流网络。控制器采用于d轴定向于并网点电压的方式,控制目标为消除负序电流,无功功率参考值为 $Q_0^* = 1.5 u_d^*(0.9 - u_d^*)^{[19]}$;有功功率参考值由故障前有功功率和逆变器的限流值共同决定(不超过电流上限时由前者决定,越限时由后者决定)。网络各部分的其他参数见附录中表A1。

由于同步电源次暂态电动势等电气量需要从稳态运行状态下获取,新能源逆变电源的故障暂态变化情况也与稳态直接相关,故先要对整个网络进行潮流计算。当进行潮流计算时,交流同步电源以平衡节点表示,新能源逆变电源和负荷均以PQ节点表示。利用MATLAB的潮流计算程序,经过4次迭代计算后得

到各节点电压如表1所示。表中, U_{RMS_calc} 、 U_{RMS_simu} 和 ε_U 分别为节点电压方均根计算值、仿真值和节点电压误差,均为标么值,后同; φ_{U_calc} 、 φ_{U_simu} 分别为节点电压相角的计算值、仿真值。对于待分析系统的潮流计算,仿真和编程计算的误差在0.02 p.u.内。

表1 稳态模式下计算值与仿真值结果

Table 1 Calculated and simulative values in steady state mode

节点	U_{RMS_calc}	$\varphi_{U_calc} / (^{\circ})$	U_{RMS_simu}	$\varphi_{U_simu} / (^{\circ})$	ε_U
1	0.928	-4.794	0.935	-4.544	0.008
2	0.891	-6.856	0.904	-6.769	0.013
3	0.831	-10.547	0.851	-10.604	0.020
4	1.000	0	1.000	0	0

在节点3处设置三相短路故障,过渡电阻为2.2 Ω 。在MATLAB中采用2.1节所述的迭代计算方法,设置收敛精度为 10^{-4} ,经过4次迭代,全网电压收敛。表2和表3中分别列出了电压、电流的MATLAB计算结果与PSCAD仿真结果。表中, I_{RMS_calc} 、 I_{RMS_simu} 和 ε_I 分别为节点电流方均根计算值、仿真值和节点电流误差,均为标么值,后同; φ_{I_calc} 、 φ_{I_simu} 分别为节点电流相角的计算值、仿真值;支路PV₁和支路PV₂分别为光伏电源DG₁、DG₂所在支路。网络各点电压的误差在0.03 p.u.内,各支路电流误差在0.7 p.u.内(电流误差较大的原因为电流值本身较大,折算后误差百分比为4%)。

表2 节点3发生三相短路时电压计算值与仿真值结果

Table 2 Calculated and simulative voltage values under three-phase short circuit fault at Node 3

节点	U_{RMS_calc}	$\varphi_{U_calc} / (^{\circ})$	U_{RMS_simu}	$\varphi_{U_simu} / (^{\circ})$	ε_U
1	0.905	-5.531	0.902	-5.311	0.005
2	0.506	-23.185	0.521	-23.049	0.015
3	0.339	-46.674	0.359	-45.012	0.022
4	0.977	-0.721	0.970	-0.719	0.007

表3 节点3发生三相短路时电流计算值与仿真值结果

Table 3 Calculated and simulative current values under three-phase short circuit fault at Node 3

支路	I_{RMS_calc}	$\varphi_{I_calc} / (^{\circ})$	I_{RMS_simu}	$\varphi_{I_simu} / (^{\circ})$	ε_I
4-1	4.732	28.057	4.483	27.792	0.249
4-2	16.332	-52.515	16.881	-51.229	0.664
2-3	16.960	-49.834	17.482	-48.545	0.650
PV ₁	1.198	22.922	1.174	19.063	0.083
PV ₂	1.000	0	1.004	3.431	0.060

为分析故障点位置、故障类型以及过渡电阻对算法的影响,在网络不同位置设置多种故障类型和不同故障电阻的短路故障。由附录中表A2所示的计算结果和仿真结果可以看出,本文所提的计算方法可以实现较为精准的计算。

为凸显本文所提方法与现有短路电流计算方法

相比的优势,以表A2中节点2处发生两相短路(过渡电阻为 $2\ \Omega$)为例进行分析,基于文献[7]中所述方法在MATLAB中编写相应程序进行短路电流计算。计算得到的短路电流幅值和误差如附录中表A3所示。对比表A2与表A3中数据可知,表A3中新能源逆变电源(特别是与故障点直接相连的新能源逆变电源)的短路电流误差较大。经初步分析,其原因可能为文献[7]中故障分量网络不包含新能源逆变电源(故障分量网络中新能源逆变电源支路开路),因而新能源逆变电源短路电流仅为正常分量网络中的电流分量。表A3中 PV_1 、 PV_2 几乎仍为额定出力证实了这点,而实际新能源出力受故障点影响,故采用该网络分解原理计算得出的误差偏大。

为刻画新能源逆变电源短路电流的变化情况,在故障稳态结果的基础上,需要进一步研究暂态电流的变化情况。为验证计算方法的通用性,实验中将新能源逆变电源的电流内环PI参数分别设为 $k_{ip}=0.015\ \Omega$ 和 $k_{ii}=0.040\ \Omega/s$,脉宽调制(PWM)的载波频率设为 $6000\ \text{Hz}$ 。故障发生后,电流指令值由功率指令值和并网点电压值计算得到,而功率指令值直接由并网点电压跌落程度决定,所以控制系统的电压外环参数基本不会影响故障暂态的电流变化情况,实验中保持 $k_{up}=1.213\ \text{S}$ 、 $k_{ui}=28.571\ \text{S/s}$ 。

对于图1中 DG_1 ,由式(8)和式(11)计算得到的电流为:

$$\begin{cases} i_d(t) = 0.328 e^{-200(t-0.3)} + 1.672 \\ i_q(t) = -1.722 e^{-200(t-0.3)} + 1.722 \end{cases} \quad t \geq t_0 \quad (20)$$

在同一坐标系中作出 d 、 q 轴电流的指令值、仿真值和计算值曲线,如图2所示。故障发生后,电流指令值根据并网点电压发生突变,PSCAD/EMTDC仿真得到的实际电流值曲线以指数变化规律跟踪指令值。如果不考虑PWM造成的电流高次谐波,依据本文所提方法求得的计算值曲线可以较为精确地反映故障暂态过程中电流的变化情况。

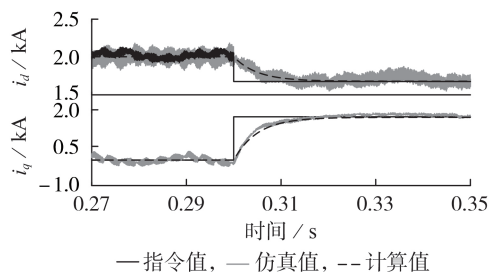


图2 PV_2 暂态电流曲线

Fig.2 Transient current curves of PV_2

4 录波数据

在位于青海省的某实际光伏电站网络中验证算法的可行性。图3为该电站的局部接线图。330 kV

侧通过一回送出线接入当地某水电站。330 kV母线采用单母线接线形式,母线接有4台主变(容量为 $240\ \text{MV}\cdot\text{A}$,短路阻抗为 13.63%)。各主变35 kV侧母线上接有3段分段母线,其中母线-I、母线-II接至阵列各分区的35 kV架空出线(图中没有完全画出),而母线-III接至2台SVG(故障后退出运行),并且留有备用进线。阵列各分区的额定容量均为 $32\ \text{MW}$,各分区接线情况较为复杂,且对分析短路电流无明显影响,故图3中未详细标出。由于各逆变器的控制系统参数无法获取,此处仅分析稳态故障电流。

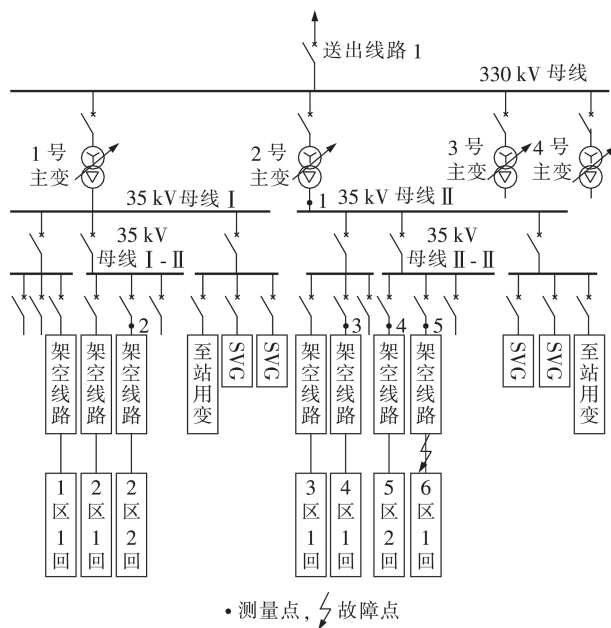


图3 实际某光伏场站部分区域接线图

Fig.3 Partial wiring diagram of a photovoltaic plant

在进行人工短路试验时光伏电站上空有云层遮挡,故障发生前电站工作于非额定工况下。图3所示送出线路I的有功功率约为 $302\ \text{MW}$,无功功率约为 $-25\ \text{Mvar}$ 。故障点位于6区汇集站出口处1回架空线上。在 $0.05\ \text{s}$ 时发生B相短路接地故障,持续时间 $0.231\ \text{s}$; $0.281\ \text{s}$ 时BC两相击穿,发展为BC两相短路接地故障, $0.359\ \text{s}$ 故障消失。由于故障发生在35 kV汇集线路上,单相接地故障并不会改变网络中的电流分布。以下主要分析 $0.281\ \text{s}$ 后的两相短路接地故障状态。

图4为35 kV母线II处(测量点1)的电压录波波形。发生单相短路接地故障时,非故障相电压升高约1.73倍;发生两相短路接地后,电压波形出现波动,原因为燃弧拉伸等状态变化导致的电阻变化。观察两相短路接地后的前2个周期,此时波形较为平稳,故各电气量均采用这2个周期数据对应的有效值作为比较对象。短路的过渡电阻未知,需根据测量点5和线路6区1回电压和电流数据估算出过

渡电阻值用于MATLAB的程序计算。

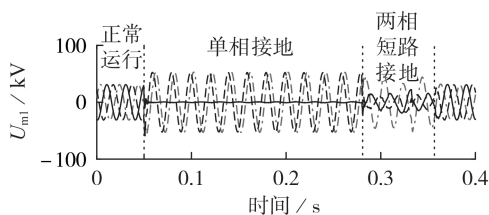


图4 35 kV母线Ⅱ(测量点1)处的电压测量值

Fig.4 Measured voltage on 35 kV Bus-II
(Measurement point 1)

表4为两相短路接地故障时故障相电流的计算值与测量值。表中, I_{RMS_meas} 为故障相电流测量值。由表可知,通过计算值与测量值数据的对比,计算程序具有较好的计算可行性。

表4 两相短路接地故障时故障相电流的计算值与测量值

Table 4 Fault phase current of calculated and measured values under two-phase short circuit grounding fault

母线	I_{RMS_calc} / kA	I_{RMS_meas} / kA	母线	I_{RMS_calc} / kA	I_{RMS_meas} / kA
1	4.37	4.58	4	0.37	0.39
2	0.34	0.36	5	8.71	5.54*
3	0.46	0.43			

注:带“*”电流值有明显电流互感器饱和导致的畸变现象,结果不具参考价值。

5 结论

本文提出了一种包含新能源逆变电源故障稳态和暂态2种时间尺度下的短路电流计算方法。故障稳态计算方法将新能源逆变电源作为压控电流源,解决了传统稳态短路电流计算方法不能充分考虑逆变电源控制策略和非线性特性的问题。该方法通过网络各节点电压的迭代计算修正逆变电源输出功率,间接考虑了网络中各电源的交互影响。故障暂态从控制系统入手,基于故障前后稳态值以及受控制参数影响的暂态变化规律,解析出暂态过程中的电流表达式。仿真结果和录波数据证实了上述方法的可行性与准确性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 孔祥平,张哲,尹项根,等.含逆变型分布式电源的电网故障电流特性与故障分析方法研究[J].中国电机工程学报,2013,33(34):65-74.
KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study on fault current characteristics and fault analysis method of power grid with inverter interfaced distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34):65-74.

[2] 栗然,高起山,刘伟.直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J].电网技术,2011,35(10):153-158.
LI Ran, GAO Qishan, LIU Wei. Characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator under symmetrical three-phase short-circuit fault[J]. Power Sys-

tem Technology, 2011, 35(10):153-158.

[3] 贾科,杨哲,朱正轩,等.基于电流幅值比的逆变型新能源场站送出线路T接纵联保护[J].电力自动化设备,2019,39(12):82-88.
JIA Ke, YANG Zhe, ZHU Zhengxuan, et al. Pilot protection based on current amplitude ratio for Teed line in inverter-interfaced renewable energy power plants[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12):82-88.

[4] NIMPITIWAN N, HEYDT G T, AYYANAR R, et al. Fault current contribution from synchronous machine and inverter based distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1):634-641.

[5] 张惠智,李永丽.光伏电源接入的配电网短路电流分析及电流保护整定方案[J].电网技术,2015,39(8):2327-2332.
ZHANG Huizhi, LI Yongli. Short-circuit current analysis and current protection setting scheme in distribution network with photovoltaic power[J]. Power System Technology, 2015, 39(8):2327-2332.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 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.
YANG Shan, TONG Xiangqian. Short-circuit current calculation of distribution network containing distributed generators with capability of low voltage ride through[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11):93-99.

[9] 吴争荣,王钢,李海峰,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.

[10] 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. 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.

[11] BARAN M E, EL-MARKABY I. Fault analysis on distribution feeders with distributed generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4):1757-1764.

[12] JIA K, LI Y, FANG Y, et al. Transient current similarity based protection for wind farm transmission lines[J]. Applied Energy, 2018, 225:42-51.

[13] 李建林,徐少华.直接驱动型风力发电系统低电压穿越控制策略[J].电力自动化设备,2012,32(1):29-33.
LI Jianlin, XU Shaohua. Control strategy of low-voltage ride-through for direct-drive wind power generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(1):29-33.

[14] 章玮,王宏胜,任远,等.不对称电网电压条件下三相并网型逆变器的控制[J].电工技术学报,2010,25(12):103-110.
ZHANG Wei, WANG Hongsheng, REN Yuan, et al. Investigation on control of three-phase grid-connected inverters under

- unbalanced grid voltage conditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(12): 103-110.
- [15] 常仲学, 杨忠礼, 宋国兵, 等. 正负双序独立控制策略下的逆变器分布式电源不对称故障电流分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 44-51.
- CHANG Zhongxue, YANG Zhongli, SONG Guobing, et al. Analysis on asymmetric fault current characteristics of inverter interfaced distributed generator under positive-sequence and negative-sequence current respective control strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 44-51.
- [16] JIA J, YANG G, NIELSEN A H, et al. Impact of vsc control strategies and incorporation of synchronous condensers on distance protection under unbalanced faults[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 66(2): 1108-1118.
- [17] YAZDANI A, IRAVANI R. Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications[M]. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2010: 221-222.
- [18] STREZOSKI L, PRICA M, LOPARO K A. Generalized Δ -circuit concept for integration of distributed generators in online short-circuit calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 3237-3245.
- [19] 李彦宾, 贾科, 毕天姝, 等. 电流差动保护在逆变型新能源场站送出线路中的适应性分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 100-105.
- LI Yanbin, JIA Ke, BI Tianshu, et al. Adaptability analysis of current differential protection of outgoing transmission line emanating from inverter-interfaced renewable energy power plant[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 100-105.

作者简介:



匡晓云

匡晓云(1975—),男,江西吉安人,高级工程师,硕士,主要研究方向为信息及自动化(E-mail:kuangxy@csg.cn);

关红兵(1981—),男,湖北天门人,高级工程师,硕士,主要研究方向为继电保护运行及仿真技术(E-mail:guanhb@csg.cn);

李捷(1982—),男,广东广州人,高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:lijie2@csg.cn)。

(编辑 王欣竹)

Full-time domain short circuit current calculation method suitable for power network with inverter-interfaced renewable energy source

KUANG Xiaoyun¹, FANG Yu², GUAN Hongbing¹, LI Jie³, JIA Ke², BI Tianshu²

(1. Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510700, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. China Southern Power Grid Power Dispatch Control Center, Guangzhou 510700, China)

Abstract: The inverter-interfaced renewable energy source has no constant electromotive force after fault, so the internal electromotive force-impedance method used in the calculation of short circuit current of conventional AC network is no longer applicable. To solve this problem, a full-time domain short circuit current calculation method including fault steady state and transient state of the inverter-interfaced renewable energy source is proposed. In combination with the control strategy of the inverter-interfaced source during the calculation of fault steady state, the inverter-interfaced source is regarded as a nonlinear current source, which fully reflects its fault characteristics after short circuit faults. Based on the steady state short circuit current results, the current expression in the transient process is solved by the transient differential equation derived from the control system. The feasibility of the proposed method is verified by the comparison among the calculated values, the simulative results and the recording results.

Key words: renewable energy source; short circuit currents; steady state current; transient current

附录

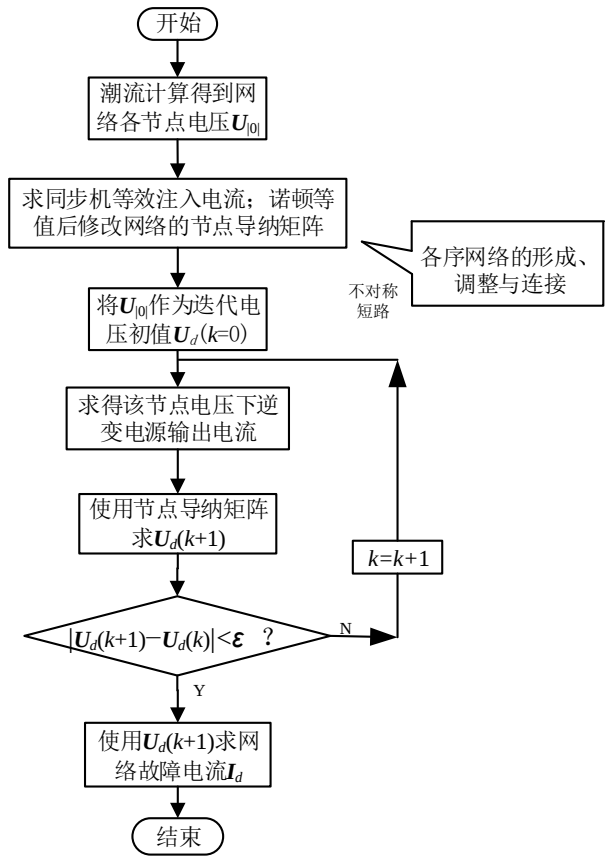


图 A1 稳态电流计算流程图
Fig.A1 Flowchart of steady-state current calculation

表 A1 新能源电源网络各部分参数
Table A1 Parameters of the renewable energy network

类型	电气量	数值
逆变器	额定功率/MW	1
	额定电压/kV	0.38
	电流环比系数/ Ω 、时间常数/ $(\Omega \cdot s^{-1})$	0.015、0.040
线路	L_{41} 阻抗/ Ω	$0.675+j2.154$
	L_{42} 阻抗/ Ω	$0.934+j2.977$
	L_{23} 阻抗/ Ω	$0.660+j1.158$
交流电源	阻抗/ Ω	$0.001+j0.198$
负荷	LD_1 功率/ $(MV \cdot A)$	$5.12+j1.66$
	LD_2 功率/ $(MV \cdot A)$	$4.88+j1.34$
	LD_3 功率/ $(MV \cdot A)$	$6.11+j1.82$

表 A2 多种短路故障下电流计算值与仿真值结果

Table A2 Current calculation value and simulation value result with various short circuit faults

故障类型	Branch	$I_{\text{RMS_calc}}$	$I_{\text{RMS_simu}}$	ε_I
节点 3 处 三相短路 $R_f = 5\ \Omega$	4-1	4.805	5.021	0.216
	4-2	13.708	13.694	0.014
	2-3	14.407	14.934	0.528
	PV ₁	1.000	1.005	0.005
	PV ₂	1.200	1.289	0.089
	4-1	4.805	4.918	0.113
	4-2	5.081	5.132	0.051
	2-3	5.290	5.351	0.061
	PV ₁	1.000	1.042	0.042
	PV ₂	1.199	1.207	0.008
节点 2 处两相 短路 $R_f = 2\ \Omega$	4-1	4.756	4.945	0.189
	4-2	5.130	5.129	0.001
	2-3	5.847	5.888	0.041
	PV ₁	1.000	1.031	0.031
	PV ₂	1.200	1.196	0.004

注： R_f 为过渡电阻。不对称故障下的电流为特征相数值。

表 A3 母线 2 处发生经 $2\ \Omega$ 电阻两相短路故障时，基于某种算法计算的短路电流值和误差

Table A3 Current calculation value and error result based on another method with fault $f^{(2)}$ @ Bus 2 $R_f = 2\ \Omega$

支路	$I_{\text{RMS_calc}}$	$I_{\text{RMS_simu}}$	ε
4-1	4.572	4.945	0.373
4-2	4.963	5.129	0.166
2-3	5.691	5.888	0.197
PV ₁	1.002	1.031	0.029
PV ₂	1.008	1.196	0.188