

计及励磁控制响应的含小水电集群配电网 复杂接地故障分析方法

毕浩然¹,李杰¹,王钢¹,曾德辉²,李晶¹,陈志峰³

(1. 华南理工大学 电力学院,广东 广州 510006;2. 广州嘉缘电力科技有限公司,广东 广州 510612;

3. 广州城市理工学院 电气工程学院,广东 广州 510800)

摘要:小水电机组在配电网中的大规模接入增大了配电网拓扑的复杂程度,在恶劣气象条件下易发生复杂故障。同时,小水电励磁系统较快的响应速度使其对小水电故障输出电流的影响不能忽略。为此,通过对小水电机组故障特征的研究和对含小水电集群配电网复杂故障的分析,计及小水电励磁控制特性的影响,将小水电机组等效为由公共连接点(PCC)电压控制的压控电流源(VCCS),并基于多口网络理论和理想变压器,构建出一种含小水电集群配电网复杂接地故障分析方法。经PSCAD/EMTDC全面仿真,结果证明该方法可精确求解复杂接地故障下小水电输出电流、系统各支路电流和各节点电压,可作为配电网复杂故障保护整定的理论依据,也可为含小水电集群配电网故障后孤岛划分和恢复重构提供理论支撑。

关键词:分布式电源;小水电;复杂故障;故障等效模型;故障分析

中图分类号:TM 713;TM 771

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204018

0 引言

在我国政府提出“力争2030年前实现碳达峰、2060年前实现碳中和”的“双碳”目标的背景下,小水电作为一种可再生、清洁的分布式电源(DG),在水力资源丰富的地区势必会得到更广泛的应用。然而,小水电接入配电网的方式以及小水电自身的故障特征却为含小水电集群配电网的故障分析带来困难。通常情况下,小水电站分布于水力资源丰富的山区,以“T”接的方式接入配电网馈线末端向电网供电。首先,这种接入方式会导致配电网中的分支线路明显增多,加深了网络结构的复杂程度,并将小水电入网线路暴露在恶劣的工作环境下。在面临极端气候时,以上因素容易在配电网中2处及以上位置同时引发接地故障,即发生复杂接地故障。若复杂接地故障相相同,则在多个接地点造成的分流效应的影响下,故障馈线的零序电流变得很小,易造成故障馈线零序电流保护拒动;若复杂接地的故障相不同,则相当于发生了相间短路,故障馈线零序电流有效值相当于本馈线故障相相电流有效值的1/3,与单相接地故障相比显著增大,易造成零序电流保护越级误动,扩大停电范围^[1]。其次,小水电站的“T”接

入网方式将配电网线路分割成多段短线路或超短线路,使相邻线路电流速断保护和限时电流速断保护的电流整定值难以配合,只能配置定时限过电流保护以确保动作的选择性。这使得配电网各线路(特别是靠近配电网末端的线路)的保护动作时间大幅延长,最大动作时间甚至可超过1 s^[2]。除此之外,小水电机组的励磁响应时间常数通常介于0.6~2.3 s之间^[3],远远小于常规大容量发电机,与含小水电配电网保护最大动作时间相当。因此在进行故障分析时,不能忽略小水电励磁控制系统对其故障特征的影响,适用于常规大容量发电机的恒压源串联恒定阻抗的故障分析模型不适用于小水电机组的故障特征分析。

现有的针对含小水电集群配电网接地故障的研究大多局限于单点故障的情况,且没有考虑受励磁系统影响的小水电故障特征。文献[4-5]将电机型DG等效为恒压源串阻抗模型,分析了含DG的中性点经小电阻接地配电网在单相接地故障下故障点和线路的各序电流特征,为保护配置提供了依据。但该方法未考虑电机型DG励磁控制系统对故障模型的影响,且难以适用于复杂接地故障。文献[6-7]采用等值解耦法求解大型同步发电机的短路输出电流,该方法可以实现对故障电流暂态过程的精确求解,但是计算速度很慢,对硬件资源提出较高要求。文献[8]在同步型DG与系统之间接入了故障电流抑制器,利用其短路时呈高阻抗的特征抑制DG输出电流对继电保护的影响,但故障电流抑制器本身的成本偏高。文献[9]通过串入灭磁电阻快速抑制短路电流上升,但灭磁电阻的接入会使转子电压迅速升高,威胁匝间绝缘。文献[10]根据DG控制特

收稿日期:2021-05-25;修回日期:2022-02-18

在线出版日期:2022-04-08

基金项目:广东省自然科学基金资助项目(2018A030310354);
中国南方电网有限责任公司科技项目(GDKJXM20185764)

Project supported by the Natural Science Foundation of Guangdong Province(2018A03010354) and the Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(GDKJXM20185764)

性的不同将其划分成不同类型的节点,使用潮流算法计算 DG 的故障电流。但该方法需计算的节点数较多,运算效率较慢,且对初值的取值要求较高。文献[11-14]计及控制方式对 DG 故障电流的影响,建立了适用于逆变型 DG 和异步型 DG 的压控电流源(VCCS)故障等效模型,但这些模型均不适用于包含小水电在内的同步型 DG。

综上,本文首先基于小水电故障穿越时的励磁控制特性,建立了小水电 VCCS 故障等效模型;其次,基于理想变压器和多口网络理论,得到了含小水电集群配电网复杂接地故障的复合序网图,并对其电压电流关系进行了分析;然后,综合以上内容提出了全局收敛的含小水电集群配电网复杂接地故障电流迭代求解算法;最后,在 PSCAD/EMTDC 平台上对所提算法进行了验证并得出结论。

1 小水电故障等效模型

小水电机组故障穿越时,各机组的励磁控制系统会根据机端电压的偏差值增大励磁电势,使机端电压得到一定程度的恢复。由于小水电的励磁时间常数与典型水电机相比很小,而含小水电集群配电网的保护动作时间较长,在进行故障分析时不能忽视励磁控制系统对小水电故障特征的影响,难以使用适用于常规大容量水电机的恒压源串联阻抗模型对小水电机组进行等效。因此,有必要在计及励磁控制响应的前提下对小水电机组的故障特性进行分析,并形成适用于小水电机组的故障等效模型。

1.1 励磁系统简化模型

随着功率半导体技术的飞速发展,包括小水电在内的几乎所有凸极同步发电机都开始采用自并励静止励磁系统^[15]。此类励磁系统以可控硅整流器作为励磁功率元件,根据机端电压与参考电压的偏差值改变整流器导通角,从而控制励磁绕组两端电势大小,进而维持机端电压的稳定。自并励静止励磁系统 IEEE 标准模型^[16]如图 1 所示。图中: U_{ref} 为设定的机端参考电压; U_t 为机端电压; ΔU 为机端电压偏差值; E_f 为输出至发电机的定子励磁电势; T_A 、 T_{B1} 、 T_{B2} 、 T_{C1} 和 T_{C2} 为各环节超前/滞后时间常数; K_R 和 K_A 为各环节放大增益倍数; V_{Rmax} 为发电机励磁电势顶值。

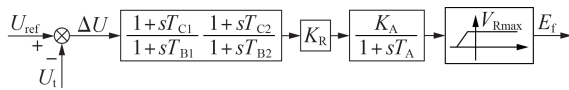


图 1 自并励静止励磁系统 IEEE 标准模型

Fig.1 IEEE standard model of self-shunt static exciting system

由于自并励静止励磁系统具有较高的响应速度(最快可达几十毫秒),在进行故障电流计算时可忽略励磁系统的动态过程,其励磁特性方程可简化为:

$$E_f = \min(K_v(U_{ref} - U_t), V_{Rmax}) \quad (1)$$

式中: $\min(\cdot, \cdot)$ 为最小值函数; K_v 为励磁系统的增益系数,小水电机组的增益系数一般取在 30~150 之间^[17]。

1.2 小水电 VCCS 故障等效模型

在得到励磁系统简化模型后,为了分析励磁电势 E_f 对小水电定子侧电气量的影响,还需建立计及 E_f 的小水电定子电压电流方程。由于对小水电机组故障特性进行研究的主要目的是为含小水电集群配电网的自适应保护的整定提供参考,而在配电网的自适应保护中,一般使用故障后稳态值作为整定参考值^[18-19]。因此可直接对小水电发电机故障后的稳态输出电流进行分析。小水电机组故障后稳态 d 、 q 轴定子电压电流关系^[19]为:

$$\begin{cases} u_d = X_q i_q - r_a i_d \\ u_q = E_f - X_d i_d - r_a i_q \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为定子电压和定子电流的 d 、 q 轴分量, X_d 、 X_q 分别为定子稳态同步电抗 d 、 q 轴分量, E_f 为稳态开路电势, r_a 为定子电阻,以上变量均为标么值。

由于同步发电机的定子电抗远大于定子电阻,在分析中可认为 $r_a \approx 0$;故障后稳态过程中阻尼绕组 D、Q 中无电流,定子 q 轴仅存在励磁绕组电势,因此定子稳态开路电势等于定子励磁电势 E_f ,即 $E_q = E_f$ 。在进行以上假设后,式(2)可简化为:

$$\begin{cases} i_q = \frac{u_d}{X_q} \\ i_d = \frac{E_f - u_q}{X_d} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可知,小水电的故障输出电流与机端电压和励磁电势相关。由于小水电通常以“T”接方式直接接入配电网且用于连接的线路很短,可近似认为小水电机端电压等于公共连接点(PCC)处电压 U_{PCC} 。综合式(1)与式(3),可将故障穿越下的小水电机组等效为一个如图 2 所示的故障输出电流 I_G 受 PCC 处电压控制的 VCCS 模型。图中: $f(U_{PCC,d})$ 为含 PCC 处电压 d 轴分量 $U_{PCC,d}$ 的函数; $g(E_f, U_{PCC,q})$ 为含 E_f 及 PCC 处电压 q 轴分量 $U_{PCC,q}$ 的函数。

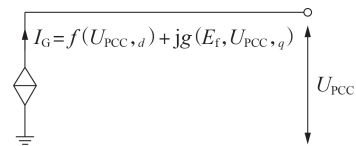


图 2 小水电机组 VCCS 故障等效模型

Fig.2 VCCS fault equivalent model of small hydropower unit

2 含小水电集群配电网复杂接地故障分析

根据故障相别,配电网复杂接地故障可分为同

相复杂接地故障和异相复杂接地故障。本节首先以2点异相复杂接地故障为例,分析故障后含小水电集群配电网各线路电压电流关系,再由此推导出适用于同相复杂接地故障与异相复杂接地故障的含小水电集群配电网复杂故障分析方法。

2.1 2点异相复杂接地故障分析方法

典型的10 kV含小水电集群配电网拓扑如附录A图A1所示。假设图A1所示配电网中 f_1 处发生B相接地故障, f_2 处发生C相接地故障。根据对称分量法与多口网络理论构建系统复合序网图:对于正序网络,根据第1节推导出的故障等效模型,将小水电正序支路等效为VCCS;对于负序网络,由于小水电不能发出负序电流且其输出的负序电压与负序电流呈线性关系,将小水电负序支路等效为恒定阻抗;对于零序网络,由于系统电势与小水电均经过Y-Δ变压器连接到配电网,零序电流无法通过,零序网络仅包含系统线路和负载部分;健全馈线 L_3 在正序网络和负序网络中均体现为并联在系统阻抗两侧的恒定阻抗,可通过对系统阻抗进行修正的方式计及其影响;系统中的线路和负载使用恒定的正序、负序和零序阻抗等效;理想变压器的阻抗设定为0。最终构建的复合序网图如附录A图A2所示。

图A2所示复合序网的各序故障端口由理想变压器串联而成,即同一回线理想变压器侧的电流相等、电压和为0。根据理想变压器两侧电压和电流关系,计及理想变压器的变比,由图A2可得回路电流方程及其故障边界条件方程分别如式(4)、(5)所示。

$$\begin{cases} (Z_s^+ + Z_{L1}^+ + Z_{LD1}^+) I_{L1}^+ + Z_s^+ I_{L2}^+ - r Z_{LD1}^+ I_{f1}^0 = U_s - (Z_{L1,2}^+ + Z_{LD1}^+) I_{G,1}^+ \\ Z_s^+ I_{L1}^+ + (Z_s^+ + Z_{L2}^+ + Z_{LD2}^+) I_{L2}^+ - r^2 Z_{LD2}^+ I_{f2}^0 = U_s - Z_{LD2,2}^+ I_{G,2}^+ \\ [(K_1 + 1)(Z_s^- + Z_{L1}^-) + Z_{L1,2}^- + Z_{LD1}^-] I_{L1}^- + (Z_s^- + K_1 Z_s^-) I_{L2}^- - r^2 Z_{LD1}^- I_{f1}^0 = 0 \\ (Z_s^- + K_2 Z_s^-) I_{L1}^- + [(1 + K_2)(Z_s^- + Z_{L2}^- + Z_{LD2,1}^-) + Z_{LD2,2}^-] I_{L2}^- - r(K_2 Z_{LD2,1}^- + Z_{LD2}^-) I_{f2}^0 = 0 \\ (Z_s^0 + Z_{L1}^0) I_{f1}^0 + Z_s^0 I_{f2}^0 + U_{f1}^0 = 0 \\ Z_s^0 I_{f1}^0 + (Z_s^0 + Z_{L2}^0) I_{f2}^0 + U_{f2}^0 = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} r^2 I_{L1}^+ + \frac{r(Z_{LD1}^+ - K_3 Z_{L1,2}^+)}{(1 + K_3) Z_{LD1}^+} I_{L1}^- - \left(\frac{2 + K_3}{1 + K_3} + \frac{3R_{f1}}{Z_{LD1}^+} \right) I_{f1}^0 + \frac{U_{f1}^0}{Z_{LD1}^+} = -r^2 I_{G,1}^+ \\ \frac{r Z_{LD2}^+}{Z_{LD2,2}^+} I_{L2}^+ + r^2 \left(\frac{Z_{LD2}^-}{Z_{LD2,2}^-} - K_4 \right) I_{L2}^- - \left(\frac{2Z_{LD2}^+ - K_4 Z_{LD2,2}^+}{Z_{LD2,2}^+} + \frac{3R_{f2}}{Z_{LD2,2}^+} \right) I_{f2}^0 + \frac{U_{f2}^0}{Z_{LD2,2}^+} = -r I_{G,2}^+ \end{cases} \quad (5)$$

式中:各参数的上标“+”、“-”和“0”分别表示正序、

负序和零序; Z_s^+ 、 Z_s^- 分别为计及线路 L_3 影响的系统正、负序等值阻抗; Z_s^0 为系统零序等值阻抗,其值约等于中性点接地阻抗; U_s 为系统电势; I_{f1} 、 I_{f2} 和 U_{f1} 、 U_{f2} 分别为故障点 f_1 、 f_2 的电流和电压; I_{L1} 、 I_{L2} 分别为母线出口处馈线 L_1 、 L_2 电流; $I_{G,1}$ 和 $I_{G,2}$ 为小水电输出的故障电流; Z_{L1} 、 $Z_{L1,1}$ 、 $Z_{L1,2}$ 和 Z_{LD1} 分别为馈线 L_1 中故障点上游、小水电 G_1 上游、小水电 G_1 到故障点及故障点下游的线路阻抗,且正序电路中存在 $Z_{L1}^+ = Z_{L1,1}^+ + Z_{L1,2}^+$; Z_{L2} 、 $Z_{LD2,1}$ 、 $Z_{LD2,2}$ 和 Z_{LD2} 分别为馈线 L_2 中故障点上游、小水电 G_2 到故障点、小水电 G_2 下游及故障点下游的线路阻抗,且正序电路中存在 $Z_{LD2}^+ = Z_{LD2,1}^+ + Z_{LD2,2}^+$; R_{f1} 、 R_{f2} 分别为故障点 f_1 、 f_2 的过渡电阻; r 为移相算子,其值为 $r = e^{j120^\circ}$; K_1 — K_4 为恒定的阻抗系数,其表达式如附录B式(B1)所示。式(4)与式(5)中共包括8个方程、8个未知量,联立两式可解出故障后馈线 L_1 和 L_2 正序、负序、零序电流以及故障点 f_1 、 f_2 处零序电压。进而可计算出含小水电集群配电网2点接地故障后电网各节点电压与各支路电流。式(4)、(5)可以写成矩阵形式,如附录B式(B2)所示。

在含小水电配电网发生2点同相复杂接地故障的情况下,根据同相故障相对复合序网中理想变压器的变比做相应修改,即可使上述方法应用于同相复杂接地故障的故障分析。

2.2 多点任意相复杂接地故障分析方法

在式(B1)的基础上,通过增加并联在母线节点处的故障支路,可将2.1节所提方法扩展为适用于含小水电集群配电网任意相复杂接地的故障分析方法。

设含小水电集群配电网共包含 m 条故障回线、 n' 台小水电机组、 h 个接地故障点。则在式(B1)的基础上,每增加1条故障回线 p ,式(B1)中的列向量 I_L^+ 、 I_L^- 和 U_f^0 分别增加1行 $I_{L,p}^+$ 、 $I_{L,p}^-$ 和 $U_{f,p}^0$,系数矩阵增加4列,其他项不变;每在第 i 条馈线上增加1台小水电机组 j ,则在式(B1)等号右侧列向量第 i 行增加一项 $Z_{down,j}^+ I_{G,j}$ ($I_{G,j}$ 为本馈线接入的第 j 台小水电机组的故障输出电流),在第 $2m+h+i$ 行增加一项 $I_{G,j}$ 。扩展后的求解矩阵如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} Z_{s,s}^+ & 0 & -R_1 Z_{LD}^+ & 0 \\ 0 & Z_{s,s}^- & -R_2 Z_{LD}^- & 0 \\ 0 & 0 & Z^0 & E \\ R_2 Z_{FS}^+ & R_1 Z_{FS}^- & -Z_{FS}^0 & 1/Z_{LD}^+ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \\ I^0 \\ U^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s - \sum_{j=1}^{n'} Z_{down,j}^+ I_{G,j} \\ 0 \\ 0 \\ -\sum_{j=1}^{n'} R_2 I_{G,j} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: I^+ 、 I^- 和 I^0 分别为各馈线出口处的正序、负序和零序电流列向量; U^0 为各馈线故障点的零序电压列向量; U_s 为系统电压的列向量; $I_{G,j}$ 为各馈线中小水电机组输出故障电流的列向量;阻抗矩阵中各子矩

阵定义如附录C所示,均为 $m \times m$ 阶方阵。

综上,在配电网各条馈线的线路参数、负载参数、故障点位置、故障相别、各小水电机组负序阻抗和接入位置都已确定的前提下,可唯一确定复杂接地故障求解方程的阻抗矩阵 Z 。

3 含小水电集群配电网故障电流迭代求解算法

根据式(6)可知,在求解含小水电集群配电网故障电流时,需以系统电势 U_s 和各小水电机组故障电流 $I_{G,j}$ 作为已知量。但根据第1节的分析, $I_{G,j}$ 具有非线性特征,无法直接用线性方法求解。为此,本文使用一种通用性较强且全局收敛的含小水电集群配电网复杂接地故障电流迭代求解算法进行故障分析。

首先,以各小水电机组的额定电流作为其故障输出电流的初值 $I_{G,j}^{(0)}$,将其代入式(6),求解各馈线出口处各序电流与各故障点处零序电压。之后,利用网络电压电流关系求出各小水电机组PCC处电压。进一步地,基于式(1)、(3)建立小水电故障输出电流迭代求解公式如下:

$$\begin{cases} E_{f,j}^{(n-1)} = \min \left(K_{v,j} \left(U_{ref,j} - |U_{PCC,j}^{(n-1)}| \right), V_{Rmax} \right) \\ I_{Gq,j}^{(k)} = \frac{U_{PCCd,j}^{(n-1)}}{X_{q,j}} \\ I_{Gd,j}^{(n)} = \frac{E_{f,j}^{(n-1)} - U_{PCCq,j}^{(n-1)}}{X_{q,j}} \end{cases} \quad (7)$$

式中:上标 (n) 表示迭代次数,下标中的 j 、 d 、 q 分别表示第 j 台小水电机组各电气量的 d 、 q 轴分量,如 $I_{Gd,j}$ 、 $I_{Gq,j}$ 和 $U_{PCCd,j}$ 、 $U_{PCCq,j}$ 分别为本馈线接入的第 j 台小水电机组的故障输出电流和PCC处电压的 d 、 q 轴分量,其余变量定义类似。将上一轮迭代计算出的 $U_{PCC,j}^{(n-1)}$ 代入式(7),计算出本轮迭代的小水电机组故障电流修正值 $I_{G,j}^{(n)}$ 后,将 $I_{G,j}^{(n)}$ 继续代入式(6)所示矩阵进行下一轮迭代求解,直至 $I_{G,j}^{(n)}$ 满足如式(8)所示的迭代收敛判据。

$$\max \left(|I_{G,j}^{(n)} - I_{G,j}^{(n-1)}| \right) < \varepsilon \quad (8)$$

式中: ε 为一较小定值,可根据需要的计算精度设定。当收敛判据得到满足后,将最后一轮迭代计算出的各故障馈线零序电流 I_{L0}^0 、各馈线上小水电故障电流 $I_{G,j}$ 和各故障点零序电压 U_{f0}^0 作为结果输出,停止迭代。本文所提的零序电流迭代求解算法流程图如附录D图D1所示。

4 仿真验证

4.1 不同故障场景下算法准确性测试

为验证所提方法的准确性,首先在PSCAD/EMTDC平台下搭建如附录A图A1所示的10 kV含小

水电集群配电网模型,模型参数如附录E表E1—E3所示。之后,使用PSCAD/EMTDC软件得到故障后配电网故障电气量的仿真值。并在MATLAB软件中编写本文所提含小水电集群配电网故障电流迭代求解算法进行求解,将使用MATLAB计算出的理论值与PSCAD中的仿真值进行比较。计算结果保留小数点后4位,因此取 $\varepsilon = 10^{-4}$ 。

为了测试本文所提方法在不同故障相和不同过渡电阻下的精度,设置了如下3种不同的复杂接地故障场景进行对比分析:①场景1,将小水电 G_1 、 G_2 按照图A1所示位置接入配电网,点 f_1 发生B相接地故障,点 f_2 发生C相接地故障;②场景2,将小水电 G_1 按照图A1所示位置接入配电网,将小水电 G_3 接入图A1所示 G_2 的位置,点 f_1 发生B相接地故障,点 f_2 发生C相接地故障;③场景3,将小水电 G_1 — G_3 按照图A1所示位置接入配电网,点 f_1 和点 f_2 均发生A相接地故障。

附录F表F1—F6中列写了上述3种不同故障场景下各故障量幅值的理论计算值、仿真值以及绝对误差和相对误差。用于对比分析的故障量包括各故障馈线出口处零序电流 I_{L1}^0 、 I_{L2}^0 ,故障馈线上各小水电输出的故障电流 I_{G1}^+ 、 I_{G2}^+ ,以及各故障点处零序电压 U_{f1}^0 、 U_{f2}^0 。

根据表F1—F6中的数据:本文所提故障分析方法在所设故障场景1—3中测得故障馈线出口零序电流的最大绝对误差分别为5.7、6.3、1.6 A;最大相对误差分别为0.61%、0.65%、8.47%;测得小水电输出电流的最大绝对误差分别为6.6、6.4、5.3 A;最大相对误差分别为4.31%、6.31%、6.78%;测得故障点零序电压的最大绝对误差分别为50.9、40.7、11.0 V;最大相对误差分别为1.69%、0.93%、6.78%。由于故障点 f_1 靠近线路末端,故障点 f_2 靠近线路首端,测出的2点故障馈线零序电流相差较大,但最大相对误差仍保持在10%以内。

综上,本文所述故障分析方法对不同过渡电阻和不同小水电接入容量下的复杂接地故障均有较高的准确性。且对比表F1、F2与表F5、F6可知,本文所提方法可同时适用于同相复杂接地故障和异相复杂接地故障。

4.2 与传统恒压源串联阻抗模型进行对比

为对比分析本文所提小水电VCCS故障等效模型和传统的恒压源串联阻抗模型的准确性,在场景1下设定故障点 f_1 、 f_2 的过渡电阻均为 0.01Ω ,分别使用本文所提VCCS模型与文献[5]所述恒压源串联阻抗模型计算各故障馈线出口处三序电流、各故障点零序电压及各小水电输出的正序故障电流,并与仿真值对比计算出绝对误差与相对误差,测量结果如附录F表F7所示。对比表F1和表F7中的数

据:使用恒压源串联阻抗模型测得的各故障量最大相对误差为31.73%;使用VCCS模型测得的各故障量最大相对误差为4.20%。由此可知,本文所述故障分析方法可以准确测量故障馈线的正序、负序和零序分量,且在计算精确度上高于基于传统恒压源串联阻抗模型的故障分析方法。

5 结论

1)本文研究了一种适用于小水电机组的VCCS故障等效模型,相较于传统的恒压源串联阻抗发电机等效模型,计及了小水电机组励磁控制响应的影响,其可以精确、快速地计算得到小水电机组的故障输出电流。

2)基于多口网络理论和理想变压器建立了复杂故障下含多小水电接入配电网的复合序网图,并在此基础上形成一种基于迭代计算的含小水电集群配电网复杂接地故障分析算法。经PSCAD/EMTDC进行全面仿真可知,该算法可实现对复杂接地故障下各小水电故障输出电流、系统各支路电流和各节点电压的精确求解。

3)本算法能够实时预测含小水电集群配电网故障后各支路三序电流和故障点电压,可以为含小水电集群配电网的保护提供整定值,也可为含小水电集群配电网故障后孤岛划分和恢复重构提供技术支持。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 喻磊,郭晓斌,韩博文,等.小电阻接地系统馈线自适应零序电流保护原理及装置实现[J].电力自动化设备,2017,37(11):125-131,137.
YU Lei, GUO Xiaobin, HAN Bowen, et al. Principle of adaptive zero-sequence current protection and implementation of its device for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(11): 125-131, 137.
- [2] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 3 kV~110 kV 电网继电保护装置运行整定规程: DL/T 584—2007[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.
- [3] 彭勋. 实际电网负荷建模及综合负荷特性对暂态稳定性影响研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013.
PENG Xun. Load modeling and the research of impact of composite load characteristics on the transient stability of actual grid[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [4] 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.
- [5] 锁军, 张志华, 杨杉, 等. 考虑分布式电源低电压穿越特性的配电网短路电流计算方法[J]. 陕西电力, 2018, 46(4): 22-27, 56.
SUO Jun, ZHANG Zhihua, YANG Shan, et al. A short-circuit current calculation method of distribution network with distributed generation considering low voltage ride through characteristics[J]. Shaanxi Electric Power, 2018, 46(4): 22-27, 56.
- [6] 吴大立, 徐正喜, 郑中祥, 等. 用等值解耦模型计算12相同步整流发电机短路电流[J]. 高电压技术, 2010, 36(4): 1050-1054.
WU Dali, XU Zhengxi, ZHENG Zhongxiang, et al. Short circuit current calculation of twelve-phase synchronous rectifier generator using equivalent and decoupling model[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 1050-1054.
- [7] 郝晓亮, 付立军, 马凡, 等. 中压直流综合电力系统建模与实时仿真实现方法[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1100-1108.
HAO Xiaoliang, FU Lijun, MA Fan, et al. Modeling and real-time simulation of MVDC integrated power system[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1100-1108.
- [8] CHEN B C, WEI L L, TIAN C H, et al. Parameter design and performance investigation of a novel bridge-type saturated core fault current limiter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 1049-1057.
- [9] YAZDANPANAHI H, XU W, LI Y W. A novel fault current control scheme to reduce synchronous DG's impact on protection coordination[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 542-551.
- [10] 薛俞, 李月乔, 刘文霞, 等. 柔性互联配电系统连锁故障风险评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(8): 112-119.
XUE Yu, LI Yueqiao, LIU Wenxia, et al. Risk assessment of cascading failures in flexible interconnected power distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 112-119.
- [11] 季亮, 张海涛, 任建铭, 等. 基于逆变型DG控制特性的微电网故障特征分析[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 165-172.
JI Liang, ZHANG Haitao, REN Jianming, et al. New microgrid fault analysis method based on inverter-type DG characteristic[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 165-172.
- [12] 肖繁, 张哲, 尹项根, 等. 含双馈风电机组的电力系统故障计算方法研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 14-23.
XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. The fault calculation method of power systems including doubly-fed induction generators[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 14-23.
- [13] 杨伟涛, 曾德辉, 汪隆君, 等. 逆变型分布式电源接入对小电阻接地系统馈线零序电流保护的影响[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 162-168.
YANG Weitao, ZENG Dehui, WANG Longjun, et al. Influence of inverter interfaced distributed generators on zero-sequence current protection for feeder of low resistance grounding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 162-168.
- [14] 魏传芝, 施啸寒, 张恒旭, 等. 考虑电流指令跟踪能力的PQ控制逆变型分布式电源故障模型[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 59-65.
WEI Chuazhi, SHI Xiaohan, ZHANG Hengxu, et al. Fault model of IIDG with PQ control considering tracking capability of current command[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 59-65.
- [15] 邓昭俊. 小水电自并励发电机励磁控制系统研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2016.
DENG Zhaojun. Research on excitation control system of small hydropower self-shunt excitation generator[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2016.
- [16] 霍承祥, 高磊, 吴剑超, 等. 励磁系统动态增益对凸极发电机暂态稳定的影响[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 58-63.
HUO Chengxiang, GAO Lei, WU Jianchao, et al. Effect of dynamic gain of excitation system on transient stability of salient pole generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 58-63.

- [17] 曾德辉,王钢,李海峰,等. 小电阻接地配电网多回线故障分析与自适应零序电流保护[J]. 电力自动化设备,2019,39(5):45-52.
ZENG Dehui, WANG Gang, LI Haifeng, et al. Fault analysis of multi-feeder grounding fault and self-adaptive zero-sequence current protection scheme for low-resistance grounding distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5):45-52.
- [18] 曾德辉,王钢,郭敬梅,等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护方案[J]. 电力系统自动化,2017,41(12):86-92.
ZENG Dehui, WANG Gang, GUO Jingmei, et al. Adaptive current protection scheme for distribution network with inverter-interfaced distributed generators[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12):86-92.
- [19] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:30-37.

作者简介:



毕浩然

毕浩然(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 201920113664@mail.scut.edu.cn);

李 杰(1994—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: 201610101723@mail.scut.edu.cn);

王 钢(1966—),男,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统控制保护及自动化、高压直流输电技术(E-mail: wangg@scut.edu.cn);

曾德辉(1988—),男,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail: zdh_scut@163.com)。

(编辑 王欣竹)

Complex grounding fault analysis method for distribution networks with micro-hydropower clusters considering excitation control response

BI Haoran¹, LI Jie¹, WANG Gang¹, ZENG Dehui², LI Jing¹, CHEN Zhifeng³

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China;

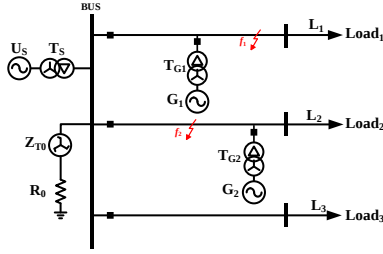
2. Guangzhou Jiayuan Electric Power Technology Co., Ltd., Guangzhou 510612, China;

3. School of Electrical Engineering, Guangzhou City University of Technology, Guangzhou 510800, China)

Abstract: The intensive access of micro-hydropower units increases the complexity of the topology of the distribution network, which is prone to complex faults under extreme weather conditions. At the same time, the fast response speed of micro-hydropower excitation system makes its influence on the output fault current of micro-hydropower cannot be ignored. Therefore, through the study on the fault characteristics of micro-hydropower units and the analysis of complex fault of distribution network with micro-hydropower clusters, considering the influence of the excitation control characteristics of micro-hydropower, micro-hydropower units are equivalent to VCCS (Voltage-Controlled Current Source) controlled by the voltage of PCC (Point of Common Coupling). Combined with the theory of multi-port network and the ideal transformer, a complex grounding fault analysis method for distribution networks with micro-hydropower clusters is constructed. Through the overall simulation by PSCAD/EMTDC, the results show that the proposed method can not only accurately compute the micro-hydropower output current, branch current and voltage of each node under complex grounding faults, and provide the theoretical basis for the protection setting of complex faults in distribution network, but also provide theoretical support for islanding division and restoration reconfiguration after faults of power system with micro-hydropower clusters.

Key words: distributed power generation; micro-hydropower; complex fault; fault equivalent model; fault analysis

附录 A



注：\$U_s\$ 为系统等值电势，\$T_s\$ 为系统主变压器，10 kV 母线的中性点经曲折变压器 \$Z_{T0}\$ 与接地电阻 \$R_0\$ 接入大地，\$L_1\$—\$L_3\$ 为连接于同一母线的 3 条馈线，\$G_1\$ 与 \$G_2\$ 为两小水电机组，经过 Y-Δ 理想变压器“T”接入馈线 \$L_1\$ 与 \$L_2\$，\$f_1\$ 与 \$f_2\$ 为 2 处接地故障。

图 A1 典型 10 kV 含小水电集群配电网拓扑图

Fig.A1 Topology of typical 10 kV distribution network with micro-hydropower cluster

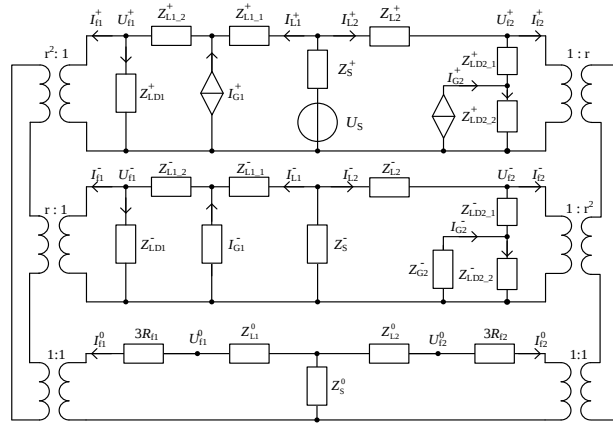


图 A2 基于理想变压器的两点异相接地故障复合序网图

Fig.A2 Composite sequence network diagram of two point out of phase grounding fault based on ideal transformer

附录 B

$$\begin{cases} K_1 = \frac{Z_{L1,2}^- + Z_{LD1}^-}{Z_{G1}^-} \\ K_2 = \frac{Z_{LD2,2}^-}{Z_{G2}^-} \\ K_3 = \frac{Z_{LD1}^-}{Z_{G1}^- + Z_{L1,2}^-} \\ K_4 = \frac{Z_{LD2,2}^-}{Z_{G2}^- + Z_{LD2,2}^-} \end{cases} \quad (B1)$$

$$\begin{bmatrix} Z_s^+ + Z_{L1}^+ + Z_{LD1}^+ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ Z_s^+ & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & (K_1 + 1)(Z_s^+ + Z_{L1,1}^+) + Z_{L1,2}^+ + Z_{LD1}^+ & 0 & 0 & -r^2 Z_{LD1}^+ & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_s^+ + K_1 Z_s^+ & 0 & 0 & -r^2 Z_{LD1}^+ & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & Z_s^+ + K_2 Z_s^+ & 0 & 0 & 0 & -r(K_2 Z_{LD2,1}^- + Z_{LD2}^-) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s^0 + Z_{L2}^0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & Z_s^0 + Z_{L1}^0 & 0 & 1 \\ r^2 & 0 & \frac{r(Z_{LD1}^+ - K_3 Z_{L1,2}^+)}{(K_1 + 1)Z_{LD1}^+} & 0 & 0 & -\left(\frac{2 + K_3}{1 + K_3} + \frac{3R_{f1}}{Z_{LD1}^+}\right) & 0 & \frac{1}{Z_{LD1}^+} & 0 \\ 0 & \frac{rZ_{LD2}^+}{Z_{LD2,2}^+} & 0 & r^2 \left(\frac{Z_{LD2}^+}{Z_{LD2,2}^+} - K_4\right) & 0 & 0 & -\left(\frac{2Z_{LD2}^+ - K_4 Z_{LD2,2}^+ + 3R_{f2}}{Z_{LD2,2}^+ + Z_{LD2,2}^+}\right) & 0 & \frac{1}{Z_{LD2,2}^+} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{L1}^+ \\ I_{L2}^+ \\ I_{LD1}^+ \\ I_{LD2,1}^+ \\ I_{LD2,2}^+ \\ U_{f1}^0 \\ U_{f2}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_s - (Z_{L1,2}^+ + Z_{LD1}^+)I_{G1}^+ \\ U_s - Z_{LD2,2}^+ I_{G2}^+ \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -r^2 I_{G1}^+ \\ -r I_{G2}^+ \end{bmatrix} \quad (B2)$$

附录 C

$\mathbf{Z}_{s,s}^+$ 的对角线元素为 $\mathbf{Z}_{ss,ii}^+ = \mathbf{Z}_s^+ + \mathbf{Z}_{Li}^+ + \mathbf{Z}_{LDi}^+$ ，非对角线元素均为 $\mathbf{Z}_s^+$ ； $\mathbf{Z}_{LD}^+$ 为对角线矩阵，主对角线元素为 $\mathbf{Z}_{LD}^+$ ； $\mathbf{Z}_{down,j}^+$ 为对角线矩阵，主对角线元素分别为各馈线中第 j 个小水电下游正序阻抗和； $\mathbf{Z}_{s,s}^-$ 为非对角线矩阵，矩阵元素与小水电接入配电网位置相关； $\mathbf{Z}_{LD}^-$ 、 $\mathbf{Z}_{FS}^+$ 、 $\mathbf{Z}_{FS}^-$ 为对角线矩阵，主对角线元素与小水电接入配电网位置相关； $\mathbf{R}_1$ 和 $\mathbf{R}_2$ 均为对角线矩阵， $\mathbf{R}_2 = 1/\mathbf{R}_1$ ，而 $\mathbf{R}_1$ 的对角线元素可表示为：

$$r_{s,ii} = \begin{cases} 1 & L_i \text{ A相故障} \\ r & L_i \text{ B相故障} \\ r^2 & L_i \text{ C相故障} \end{cases} \quad (C1)$$

附录 D

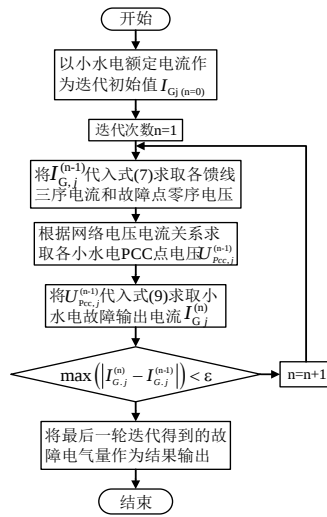


图 D1 故障电流迭代求解算法流程图

Fig.D1 Flowchart diagram of iterative solution algorithm for fault current

附录 E

表 E1 系统与负载参数

Table E1 Parameters of system and load

参数名	参数值
系统正序等值阻抗	0.000 1+j0.3607 Ω
主变压器变比	110 kV/10.5 kV
中性点接地变压器阻抗	j12 Ω/phase
中性点接地电阻	12 Ω
负载阻抗	10.000+j4.843Ω
负载额定功率因数	0.90

注：模型中 10 kV 母线经联络线和主变压器与外部大电网相连，母线中性点经接地变压器与阻抗接地。

表 E2 线路参数

Table E2 Parameters of line

线路类型	型号	正序阻抗/(Ω km ⁻¹)	负序阻抗/(Ω km ⁻¹)
电缆线	YJV-3×300	0.06+j0.089	0.6+j0.267
架空线	LGJ-185	0.158+j0.36	0.474+j1.08

注：从母线辐射出的 3 条馈线均为电缆-架空线混合线路，3 条馈线的电缆段长度分别为 8、10、12 km，架空线段长度分别为 1.8、1.5、1.2 km

表 E3 小水电参数

Table E3 Parameters of micro-hydropower

序号	额定功率/MW	额定线电压/kV	q 轴同步电抗	d 轴同步电抗	励磁增益系数	励磁顶值电压
G ₁	1.00	10	0.600	1.050	30	4.5
G ₂	0.63	10	0.533	1.584	50	4.5
G ₃	0.50	10	0.614	1.533	80	4.5

注：“T”接入配电网的小水电 G₁、G₂ 距母线的距离分别为 5 km 和 7 km， q 轴同步电抗、 d 轴同步电抗和励磁顶值电压均为标么值， f_1 与 f_2 距母线的距离分别为 8 km 和 3 km。

附录 F

表 F1 场景 1 下异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=0.01 \Omega$ 时各物理量的对比结果Table F1 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances in Case 1 when $R_{f1}=R_{f2}=0.01 \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^0	0.926 4 kA	0.932 1 kA	0.61
I_{L2}^0	0.969 9 kA	0.975 2 kA	0.54
$I_{G,1}^+$	0.201 2 kA	0.194 6 kA	3.39
$I_{G,2}^+$	0.084 4 kA	0.081 0 kA	4.20
U_{f1}^0	4.706 5 kV	4.732 4 kV	0.55
U_{f2}^0	4.325 2 kV	4.366 7 kV	0.95

表 F2 场景 1 下异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=5 \Omega$ 时各物理量的对比结果Table F2 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances in Case 1 when $R_{f1}=R_{f2}=5 \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^0	0.235 2 kA	0.235 1 kA	0.04
I_{L2}^0	0.270 2 kA	0.270 4 kA	0.07
$I_{G,1}^+$	0.084 2 kA	0.085 9 kA	1.98
$I_{G,2}^+$	0.082 2 kA	0.078 8 kA	4.31
U_{f1}^0	2.637 2 kV	2.675 7 kV	1.44
U_{f2}^0	2.954 4 kV	3.005 3 kV	1.69

表 F3 场景 2 下异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=0.01 \Omega$ 时各物理量的对比结果Table F3 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances in Case 2 when $R_{f1}=R_{f2}=0.01 \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^0	0.924 8 kA	0.930 7 kA	0.63
I_{L2}^0	0.968 1 kA	0.974 4 kA	0.65
$I_{G,1}^+$	0.201 3 kA	0.194 9 kA	3.28
$I_{G,2}^+$	0.069 1 kA	0.065 4 kA	5.66
U_{f1}^0	4.704 0 kV	4.726 9 kV	0.48
U_{f2}^0	4.313 3 kV	4.354 0 kV	0.93

表 F4 场景 2 下异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=5 \Omega$ 时各物理量的对比结果Table F4 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances in Case 2 when $R_{f1}=R_{f2}=5 \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^0	0.234 9 kA	0.235 1 kA	0.09
I_{L2}^0	0.269 9 kA	0.269 9 kA	0.00
$I_{G,1}^+$	0.085 3 kA	0.086 8 kA	1.73
$I_{G,2}^+$	0.067 4 kA	0.063 4 kA	6.31
U_{f1}^0	2.635 8 kV	2.630 6 kV	0.20
U_{f2}^0	2.950 4 kV	2.947 1 kV	0.11

表 F5 场景 3 下异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=0.01\ \Omega$ 时各物理量的对比结果

Table F5 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances in Case 3 when $R_{f1}=R_{f2}=0.01\ \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^0	0.020 5 kA	0.018 9 kA	8.47
I_{L2}^0	0.098 1 kA	0.097 6 kA	0.51
$I_{G,1}^+$	0.072 9 kA	0.078 2 kA	6.78
$I_{G,2}^+$	0.081 8 kA	0.078 4 kA	4.34
U_{f1}^0	5.450 5 kV	5.451 0 kV	0.01
U_{f2}^0	5.622 9 kV	5.618 9 kV	0.07

表 F6 场景 3 下异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=5\ \Omega$ 时各物理量的对比结果

Table F6 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances in Case 3 when $R_{f1}=R_{f2}=5\ \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^0	0.040 7 kA	0.040 4 kA	0.74
I_{L2}^0	0.056 0 kA	0.056 0 kA	0.00
$I_{G,1}^+$	0.075 2 kA	0.079 9 kA	5.88
$I_{G,2}^+$	0.080 6 kA	0.078 0 kA	3.33
U_{f1}^0	5.040 6 kV	5.039 5 kV	0.02
U_{f2}^0	4.965 3 kV	4.964 3 kV	0.02

表 F7 场景 1 下恒压源串联阻抗模型异相复杂故障过渡电阻 $R_{f1}=R_{f2}=0.01\ \Omega$ 时各物理量的对比结果

Table F7 Comparison of out-of-phase complex faults under different fault resistances by constant voltage source series impedance model in Case 1 when $R_{f1}=R_{f2}=0.01\ \Omega$

物理量	计算值	仿真值	相对误差/%
I_{L1}^+	1.210 5 kA	1.237 6 kA	2.19
I_{L2}^+	1.271 4 kA	1.279 6 kA	0.64
I_{L1}^-	0.802 0 kA	0.807 2 kA	0.64
I_{L2}^-	0.876 6 kA	0.883 3 kA	0.76
I_{L1}^0	0.926 4 kA	0.932 1 kA	0.61
I_{L2}^0	0.969 9 kA	0.975 2 kA	0.54
U_{f1}^0	4.706 5 kV	4.732 4 kV	0.55
U_{f2}^0	4.325 2 kV	4.366 7 kV	0.95
$I_{G,1}^+$	0.201 2 kA	0.194 6 kA	3.39
$I_{G,2}^+$	0.084 4 kA	0.081 0 kA	4.20