

# 分布式电源短路计算模型及电网故障计算方法研究

尹项根<sup>1</sup>, 张哲<sup>1</sup>, 肖繁<sup>1</sup>, 杨航<sup>1</sup>, 杨增力<sup>2</sup>

(1. 强电磁与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 国网湖北省电力公司, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 分布式电源的发电模式及并网方式多样, 其馈入电网的故障电流特性与传统交流同步发电机相比存在较大差异, 使以传统交流同步电机供电电源为基础的短路电流分析理论和方法难以满足分布式电源接入后电网故障分析的要求, 给继电保护原理研究和整定计算提出了新的课题并备受关注。根据不同类型分布式电源的低压穿越运行技术要求, 建立逆变型电源的短路计算模型。并考虑异步型电源撬棒保护的动作为特征, 建立了异步型电源在电网严重和非严重故障条件下的等值计算模型。进而, 提出了含分布式电源接入的电网故障计算方法。仿真对比分析表明, 电网故障计算方法精度较高, 能更好地满足工程应用要求。

**关键词:** 分布式电源; 双馈风电机组; 逆变型分布式电源; 故障电流特性; 故障分析方法

## Study on short-circuit calculation model of distributed generators and fault analysis method of power system with distributed generators

YIN Xianggen<sup>1</sup>, ZHANG Zhe<sup>1</sup>, XIAO Fan<sup>1</sup>, YANG Hang<sup>1</sup>, YANG Zengli<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** The power generation modes and grid connected strategies of DGs are diversified, and the transient and steady-state characteristics of the fault currents provided by DGs are much different from those of the fault currents provided by conventional synchronous generator. The special fault current characteristics of DGs make the conventional fault analysis method can be no more applied for the power grid with penetration of DGs. It is a new topic for the principle and setting calculation of the relay protection. According to the low voltage ride through (LVRT) control strategy of the corresponding DGs, the short-circuit calculation model of inverter interfaced distributed generator (IIDG) is established. Then, under serious and non-serious fault conditions, the short-circuit calculation models of doubly-fed induction generator (DFIG) are proposed based on the behavior characteristic of the crowbar. Based on this, a novel fault analysis method of power system with DGs is proposed. The simulation results show that the proposed method has a high accuracy of short-circuit current calculation and can meet the requirements of engineering application.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177058 and No. 51277084).

**Key words:** distributed generator; doubly-fed induction generator; inverter interfaced distributed generator; fault current characteristic; fault analysis method

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)22-0001-09

## 0 引言

随着分布式电源的规模化接入, 其对电网运行安全的影响日益凸显。为了防止电网故障期间分布式电源大规模脱网给电网造成的冲击, 保证电网的安全稳定运行, 并网规程中明确要求分布式电源应具备良好的低电压穿越运行能力。分布式电源实施

低电压穿越运行后, 将在电网故障期间向外馈出短路电流。由于分布式电源的短路电流特性与其并网方式、低压运行控制策略以及本体保护方式等诸多因素有关, 与传统的交流同步电机相比存在较大差异, 使得以交流同步电机供电电源为基础的传统电网故障分析方法已不能满足含分布式电源接入的电网短路计算的要求。因此, 研究建立分布式电源短路计算模型和故障计算方法已成为当前亟待解决的重要问题。

基金项目: 国家自然科学基金(51177058, 51277084)

分布式电源根据其基本工作原理,可分为异步型电源(交流直接接口的异步交流电源,如双馈风电机组(DFIG))和逆变型电源(采用逆变器接口的电源(IIDG),如太阳能光伏电源)两种基本形式。迄今,国内外学者针对分布式电源故障特性和短路电流计算方法开展了多方面的研究工作<sup>[1-2]</sup>。在逆变型电源故障电流分析方面,文献[3]对微网内IIDG的故障特征进行了分析,但其分析结果不适用于直接接入电网的IIDG。文献[4]对采用恒功率控制和恒电压频率控制的IIDG的故障特征进行了研究,但没有建立其短路计算模型。文献[5]对孤岛运行的IIDG的故障电流特性进行了研究。但实际上,并网运行的IIDG的控制策略与孤岛运行的IIDG不同,从而导致其故障电流特性也存在较大区别。在含逆变型电源的电网故障分析方面,文献[6-7]根据正常并网运行控制策略,将IIDG划分为不同类型节点,利用前推回推故障分析方法求取IIDG故障电流,但所提出的故障分析解析法仅适用于含单个IIDG配电网的故障分析,难以适用于含多逆变型电源接入的电网故障分析。

对于异步型电源(双馈风电机组),在近区严重故障(即机端电压跌落较为严重)的情况下,为了保证风电机组的运行安全,撬棒保护将会动作,并通过电阻短接转子绕组以旁路转子侧变流器。在远区非严重故障(即机端电压跌落相对较小)情况下,撬棒保护不会动作,双馈风电机组的转子绕组仍由变频器进行励磁。这两种情况下,双馈风电机组的运行特性和馈出的短路电流特性大不相同<sup>[8-10]</sup>,相应的电网故障分析方法也不相同。文献[11]采用空间矢量方法推导了电网发生三相短路且撬棒保护动作后DFIG的短路电流解析表达式,并与普通异步电机模型进行了对比分析;文献[12]基于对普通感应发电机短路电流的分析,给出了DFIG最大短路电流的计算方法,并分析了撬棒电阻的阻值对短路电流的影响。以上类似分析大多仅针对撬棒保护动作的情况,而在远区故障条件下,双馈风电机组撬棒保护不动作,此时DFIG的故障电流受转子变频器励磁调节特性的影响,需针对此情况对对称与不对称短路进行分析。文献[13]提出了改进的低电压穿越控制策略,在考虑DFIG提供无功支撑的条件下,实现DFIG的不脱网运行;文献[14]对不同机端电压对称跌落情况下DFIG的故障过程进行了研究,分析了转子电流的故障特性。但以上研究未考虑DFIG在励磁调节状态的定子电流特性和等值计算模型。在含DFIG接入的电网故障分析方法方面,文献[15]将DFIG等值为次暂态电势和次暂态电抗串接的简化模型进行电网故障分析,但这种简化等值可能产生较大的计算误差。综上,虽然针对双馈电机故障电流特

性已经开展了多方面的研究工作,但主要针对三相对称短路,或者假设撬棒保护动作的这种简单故障形式,没有考虑更为复杂的不对称短路情况以及DFIG低压穿越运行控制策略的影响,缺乏相应的短路计算模型。同时,针对不同运行状况的双馈风电机组,提出合适的电网故障分析方法也是当前亟待解决的重要问题。

基于此,本文根据各类分布式电源低电压穿越运行控制策略的技术特点,建立了逆变型电源的短路计算模型;并考虑异步型电源撬棒保护的动作为特征,分别建立了异步型电源在电网严重和非严重条件下的等值计算模型。在此基础上,提出了一种适应各类分布式电源接入的电网故障分析方法,并通过仿真算例,验证了所提出的短路计算方法的正确性和优势。

## 1 分布式电源短路计算模型

### 1.1 异步型电源故障计算模型

目前异步型电源主要为各类双馈风电机组,而双馈机组的短路电流特性与其本体保护(撬棒保护)的动作为直接相关,因此,需要分别建立撬棒保护和计及励磁调节特性影响的双馈风电机组短路计算模型。

#### 1.1.1 计及撬棒保护影响的DFIG故障计算模型

对于撬棒保护动作情况,文献[16-17]提出了一种基于定子绕组磁链简化计算模型的故障电流特性分析方法。该方法通过建立两相静止坐标系下双馈风电机组的动态模型,实现对称及不对称电网故障情况下双馈风电机组故障电流特性分析。根据其分析结果可知,撬棒保护动作后,双馈风电机组定子电流中除含有稳态基频分量和衰减直流分量外,还有角频率为 $\omega_1$ 的转速频率电流分量。然而,在实际短路计算中,主要关心的是基频分量,因此需要进一步对DFIG定子电流中的稳态基频电流分量进行分析。

根据文献[18],在两相静止坐标系下定子故障电流基频分量为

$$\begin{cases} i_{s\alpha\omega_1}(t) = a_{\alpha 3} \sin(\omega_1 t) + a_{\alpha 4} \cos(\omega_1 t) \\ i_{s\beta\omega_1}(t) = a_{\beta 3} \sin(\omega_1 t) + a_{\beta 4} \cos(\omega_1 t) \end{cases} \quad (1)$$

因此,可得到三相定子故障电流的基频分量为

$$\begin{cases} i_{sa\omega_1}(t) = a_{\alpha 3} \sin(\omega_1 t) + a_{\alpha 4} \cos(\omega_1 t) \\ i_{sb\omega_1}(t) = \frac{\sqrt{3}a_{\beta 3} - a_{\alpha 3}}{2} \sin(\omega_1 t) + \frac{\sqrt{3}a_{\beta 4} - a_{\alpha 4}}{2} \cos(\omega_1 t) \\ i_{sc\omega_1}(t) = -\frac{a_{\alpha 3} + \sqrt{3}a_{\beta 3}}{2} \sin(\omega_1 t) - \frac{a_{\alpha 4} + \sqrt{3}a_{\beta 4}}{2} \cos(\omega_1 t) \end{cases} \quad (2)$$

由此可以得到 A 相正、负序分量等效计算模型如图 1 所示。从图 1 可以看出, 实际上, DFIG 稳态基频电流分量的等效计算模型即为异步电动机的等效模型。因此, 撬棒保护动作后, 双馈风电机组在正、负网络中的等值阻抗分别为

$$\begin{cases} Z_{\text{DFIG}(1)} = j\omega_1 L_{s\sigma} + (j\omega_1 L_{r\sigma} + \frac{R'_r}{s}) \parallel j\omega_1 L_m \\ Z_{\text{DFIG}(2)} = j\omega_1 L_{s\sigma} + (j\omega_1 L_{r\sigma} + \frac{R'_r}{2-s}) \parallel j\omega_1 L_m \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $L_{s\sigma}$  为定子漏抗;  $L_{r\sigma}$  为转子漏抗;  $L_m$  为定子互感;  $R'_r$  为转子绕组等效电阻。

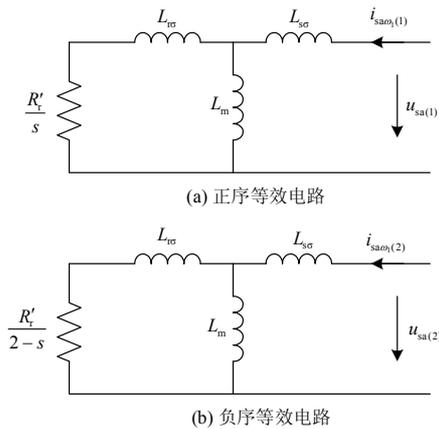


图 1 DFIG 正、负序分量等效计算模型

Fig. 1 Positive and negative sequence equivalent circuit of DFIG

### 1.1.2 计及励磁调节特性的 DFIG 故障计算模型

当撬棒保护不动作时, DFIG 的短路电流特性与其所采用的励磁控制策略有关。根据采用的控制策略方案, 文献[19-20]分别对双馈风电机组在对称和不对称故障条件下的故障电流特性进行了分析研究, 结果表明, 计及励磁调节特性影响后, DFIG 故障电流中只含有衰减的直流分量和基频分量, 不含衰减的基频分量。因此, 对双馈风电机组的故障电流计算可简化为稳态基频分量的计算。

由于 DFIG 的故障电流与转子变频器励磁调节控制时采用的低电压穿越策略有关, 因此需要根据相应的控制策略建立 DFIG 的故障计算模型。在对称故障条件下, 根据国网公司颁布的《风电场接入电力系统技术规定》<sup>[21]</sup>要求, 风电机组在电网故障期间应发出无功功率, 以稳定电网电压和缓解电网的无功压力。在不对称故障条件下, DFIG 定子绕组会产生不平衡发热、转矩出现脉动、输出功率发生振荡等现象<sup>[22]</sup>。

为保证 DFIG 的运行安全, 增强其低电压穿越

运行能力, 国内外学者提出了多种不同的控制策略, 主要包括:

(1) 平衡 DFIG 总输出电流的控制策略。通过转子侧变换器(Rotor Side Converter, RSC)和 GSC 的协调控制, 消除 DFIG 总输出电流中的负序分量, 以降低负序电流分量对 DFIG 造成的不利影响<sup>[23-24]</sup>。

(2) 恒定的 DFIG 电磁转矩的控制策略。通过 RSC 和 GSC 的协调控制, 消除电磁转矩的二倍频分量, 以减轻对风电系统轴系的机械扭振<sup>[25]</sup>。

(3) 恒定的 DFIG 系统输出有功功率的控制策略。通过 RSC 和 GSC 的协调控制, 消除整个系统总有功功率的二倍频分量<sup>[26]</sup>。

(4) 恒定的 DFIG 发电系统无功功率的控制策略。通过 RSC 和 GSC 的协调控制, 消除整个系统总无功功率的二倍频分量<sup>[27]</sup>。

研究表明, 虽然不同低压穿越运行控制策略会使其短路电流计算模型存在差异, 但其建模方法和模型结构基本相同。限于篇幅, 在本文中, 将以平衡的 DFIG 总输出电流控制策略为例, 建立其短路计算模型, 其他控制策略的计算模型也可根据上述方法导出(作者将另撰文分析), 具体从略。

#### (a) 定子电流计算模型

在电网故障条件下, 为满足电网无功支撑的需求, DFIG 将根据电压跌落幅度对无功指令进行调节<sup>[21]</sup>, 其注入电网的无功电流  $I_T$  为

$$I_T = \begin{cases} 0 & \lambda > 0.9 \\ 1.5 \cdot (0.9 - \lambda) & 0.2 \leq \lambda \leq 0.9 \end{cases} \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为机端正序电压分量幅值的标幺值。

同时, 由于转子变频器的容量较小, 为确保双馈风电机组的安全运行, 需要对转子电流大小进行限流控制。如转子电流限值为  $I_{rset}$ , 若转子电流幅值大于  $I_{rset}$ , 则正转坐标下转子电流  $d$  轴分量参考值为

$$\hat{i}_{rd+}^{+*} = \sqrt{I_{rset}^2 - i_{rd-}^{*2} - i_{tq+}^{*2} - i_{tq-}^{*2}} \quad (5)$$

式中,  $\hat{i}_{rd+}^{+*}$ 、 $\hat{i}_{tq+}^{+*}$ 、 $\hat{i}_{rd-}^{*}$  和  $\hat{i}_{tq-}^{*}$  分别为转子电流在正、反转同步旋转坐标系中的参考值。

此外, 在电网不对称故障条件下, RSC 采用消除 DFIG 定子电流的负序分量的控制策略, 可以得到反转同步旋转坐标系中的定子电流  $d$  轴和  $q$  轴分量为

$$\hat{i}_{sd-}^- = \hat{i}_{sq-}^- = 0 \quad (6)$$

结合式(4)~式(6), 通过推导可得到 DFIG 定子电流的等效计算模型为

$$\begin{cases} i_{sd+}^+ = -\frac{L_m}{L_s} \min \left[ (P_{s0} L_s) / (u_{sd+}^+ L_m), \sqrt{I_{rset}^2 - i_{tq+}^{*2} - i_{tq-}^{*2}} \right] \\ i_{sq+}^+ = 1.5 \times (0.9 - u_{sd+}^+) \\ i_{sd-}^- = 0 \\ i_{sq-}^- = 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $i_{sd+}^+$  和  $i_{sq+}^+$  分别为正转旋转坐标系中定子电流的  $d$  轴和  $q$  轴分量;  $P_{s0}$  为故障前 DFIG 的有功指令;  $u_{sd+}^+$  为正转旋转坐标系中的机端电压  $d$  轴分量。

### (b) 网侧变换器交流侧电流计算模型

为减小网侧变流器的交流侧故障电流对电网安全运行的影响, GSC 应尽可能避免从电网吸收无功功率, 并通常对 GSC 实现单位功率因数下的控制<sup>[24]</sup>。当电网发生不对称故障时, 若 RSC 以 DFIG 定子电流不含负序分量为控制目标, 为恒定 DFIG 系统总的输出电流, GSC 应以消除交流侧电流的负序分量为控制目标进行协同控制。根据网侧变换器采用的控制策略, 其交流侧电流计算模型为

$$\begin{cases} i_{gd+}^+ = -P_{g0} / u_{gd+}^+ \\ i_{gq+}^+ = 0 \\ i_{gd-}^- = 0 \\ i_{gq-}^- = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $i_{gd+}^+$ 、 $i_{gq+}^+$ 、 $i_{gd-}^-$  和  $i_{gq-}^-$  分别为反转同步旋转坐标系中的定子电流  $d$  轴和  $q$  轴分量。

### (c) DFIG 故障电流计算模型

根据上述分析可知, 故障期间 DFIG 系统输电网的电流  $i_{DFIG}$  由 DFIG 的定子电流  $i_s$  和 GSC 的交流侧电流  $i_g$  共同组成, 即  $i_{DFIG} = -i_s - i_g$ 。在转子变流器和网侧变流器均采用电网电压  $d$  轴定向矢量控制方案的条件下, 定子电流和网侧变换器交流侧馈出电流的  $d$  轴分量和  $q$  轴分量可直接相加。因此, 在平衡的 DFIG 总输出电流的控制策略下, DFIG 的等值计算模型为

$$\begin{cases} I_{DFIG(1)} = \sqrt{(-i_{sd+}^+ - i_{gd+}^+)^2 + (-i_{sq+}^+)^2} \\ \delta_{i(1)} = \arctan \left[ -i_{sq+}^+ / (-i_{sd+}^+ - i_{gd+}^+) \right] + \delta_{U(1)} \end{cases} \quad (9)$$

式中,  $\delta_{U(1)}$  为机端电压正序  $\dot{U}_f^{(1)}$  的相角。

根据上式可知, DFIG 在故障网络中的等效电路如图 2 所示。

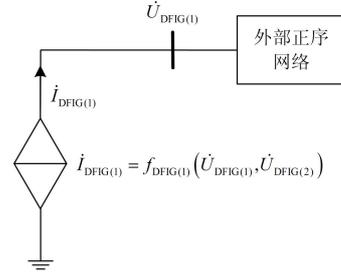


图 2 DFIG 正序等效电路

Fig. 2 Positive sequence equivalent circuit of DFIG

## 1.2 逆变型电源计算模型

逆变型电源的故障电流与其采用的低电压穿越控制策略密切相关。文献[28-29]根据逆变型电源抑制负序电流的低电压穿越控制策略, 分析了逆变器控制器在电网对称和不对称故障期间的动态响应特性。进一步地, 对逆变型分布式电源的故障电流特性进行了理论和仿真研究, 并得到了相应的简化计算模型。由分析结果可知, 逆变型电源的故障电流与传统同步发电机相比存在很大的不同。在电网对称和不对称故障情况下, 逆变型电源的故障电流与其故障前的运行状态和故障后的机端电压大小有关。因此, 根据文献[29]采用的控制策略, 逆变型电源的等值计算模型可表示为

$$\begin{cases} I_{IIDG} = \sqrt{i_d^{*2} + i_q^{*2}} \\ \varphi_{iv} = \arctan(i_q^* / i_d^*) \end{cases} \quad (10)$$

其中:

$$\begin{cases} i_d^* = i_{d0}^*, i_q^* = 0; \\ V_{IIDG(1)} \geq 0.9 \\ i_d^* = i_{d0}^*, i_q^* = 4(1 - V_{IIDG(1)}); \\ i_q^* \leq \sqrt{I_{IIDG.set}^2 - (i_{d0}^*)^2} \text{ and } V_{IIDG(1)} < 0.9 \\ i_d^* = \sqrt{I_{IIDG.set}^2 - i_q^{*2}}, i_q^* = -2(1 - V_{IIDG(1)}); \\ i_q^* > \sqrt{I_{IIDG.set}^2 - (i_{d0}^*)^2} \text{ and } V_{IIDG(1)} < 0.9 \end{cases}$$

式(10)中:  $i_{d0}^*$  为故障前逆变器电流内环的有功电流指令;  $i_d^*$ 、 $i_q^*$  分别为逆变器电流内环的  $d$ 、 $q$  轴分量的指令值。

同样地, 本文是基于抑制负序电流的控制目标而建立的 IIDG 计算模型。对于 IIDG 存在的其他控制目标, 需要根据相应的控制目标对其等值计算模型进行修改。

## 2 含不同类型分布式电源的电网故障分析方法

在传统电网故障计算中, 广泛采用对称分量法以简化计算, 即首先建立各序等值电路, 得到各序节点电压方程, 然后与故障边界条件方程联立求解, 完成故障计算。分布式电源接入电网后, 给故障计算带来的直接影响是其电源等值模型发生了变化, 需要根据相应的等值计算模型提出合适的电网故障计算方法。

根据建立的分布式电源等值计算模型可知, 在撬棒保护动作情况下, 双馈风电机组应等效为异步电动机模型, 在电网故障分析时可通过传统故障计算方法进行分析计算。对于逆变型电源和励磁调节特性影响的双馈风电机组, 其等值计算模型为受控的电流源模型, 仍可沿用上述对称分量法进行故障计算。但需要指出的是, 由于分布式电源为受控电流源, 其大小和相位不仅与其采用的控制策略有关, 还与接入节点的电压存在复杂的非线性关系, 因此, 难以像传统方法一样直接进行解析求解。解决上述问题的一种基本方法是采用迭代法进行短路电流计算, 其具体步骤如下。

(1) 根据电网结构和元件参数, 建立各序网络的节点电压方程如式(11)。

$$\mathbf{Y} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ \vdots \\ U_{DGm} \\ \vdots \\ U_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_{DGm} \\ \vdots \\ I_N \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中

$$\mathbf{Y} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Y_{n1} & Y_{n2} & \cdots & Y_{nn} \end{bmatrix}$$

(2) 根据电网故障类型建立故障边界条件方程, 如式(12)。以单相接地短路为例, 其故障相的边界条件方程为

$$\begin{cases} \dot{U}_f^{(1)} + \dot{U}_f^{(2)} + \dot{U}_f^{(0)} = 0 \\ \dot{I}_f^{(1)} = \dot{I}_f^{(2)} = \dot{I}_f^{(0)} \end{cases} \quad (12)$$

(3) 对分布式电源类型进行分类处理: 如分布式电源为逆变型电源, 则根据式(10)建立其等效电流源模型; 如分布式电源为异步型电源, 则进入步

骤(4)。

(4) 根据短路计算需求, 确定异步型电源撬棒保护的動作行为。若撬棒保护动作, 则根据式(7)对建立的各序节点电压方程(11)进行修改; 如撬棒未动作, 则根据式(9)建立异步型电源的等效电流源模型。

(5) 将分布式电源的故障前电流作为其受控电流源模型的初始值, 联立节点电压方程和故障边界条件方程进行迭代求解。

(6) 判断各节点电压在两次迭代值之间的差值是否满足设定的迭代精度值, 如满足迭代精度要求, 则进入步骤(7), 否则, 将该次计算获得的节点电压代入各受控电流源模型, 联立节点电压方程和故障边界条件方程重新迭代求解。

(7) 根据电网阻抗和获得的各节点电压, 计算各支路电流。

(8) 计算结束。

图3为含不同类型分布式电源接入的电网故障分析方法流程图。

## 3 仿真验证

为了全面验证所提出的含多种分布式电源接入的电网故障计算方法的正确性, 利用 PSCAD/EMTDC 仿真软件, 构建了如图4所示的含多类分布式电源接入的电网仿真模型。其中, 分布式电源包括撬棒保护动作的双馈风电机组、计及励磁调节特性的双馈风电机组和逆变型电源三种类型。仿真模型中假设各输电线路的型号相同, 单位长度线路参数为:  $r_{(1)} = r_{(2)} = 0.17 \Omega/\text{km}$ ,  $x_{(1)} = x_{(2)} = 0.394 \Omega/\text{km}$ ,  $r_{(0)} = 0.19 \Omega/\text{km}$ ,  $x_{(0)} = 0.43 \Omega/\text{km}$ , 线路  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L_3$  和  $L_4$  的长度分别为 1 km、1 km、1 km 和 8 km, 线路  $L_5$ 、 $L_6$  和  $L_7$  的长度均为 0.2 km。接入配电网的两台 DFIG 容量均为 49.5 MW, 额定线电压为 690 V; 定子漏电抗为 0.124 5 p.u.; 转子漏电抗为 0.124 5 p.u.; 定转子互感为 2.176 7 p.u.; 转子额定转速为 1.2 p.u.; 转子电流过流控制值  $I_{rset}$  为 1.2 p.u.。IIDG 的容量为 49.5 MW, 额定线电压为 690 V; 交流侧电感值为 0.008 mH。另外, 3 台双绕组变压器  $T_1$ 、 $T_2$  和  $T_3$  的容量均为 50/50 MVA, 变比为 0.69/36.75 kV, 联结组别为 Yd, 漏电抗为 6.5%。负荷 1、2 的等效阻抗均为  $120 + j39.11 \Omega$ , 负荷 3 的等效阻抗为  $80 + j26.08 \Omega$ 。迭代计算精度的误差门限值  $\varepsilon$  为 0.001。

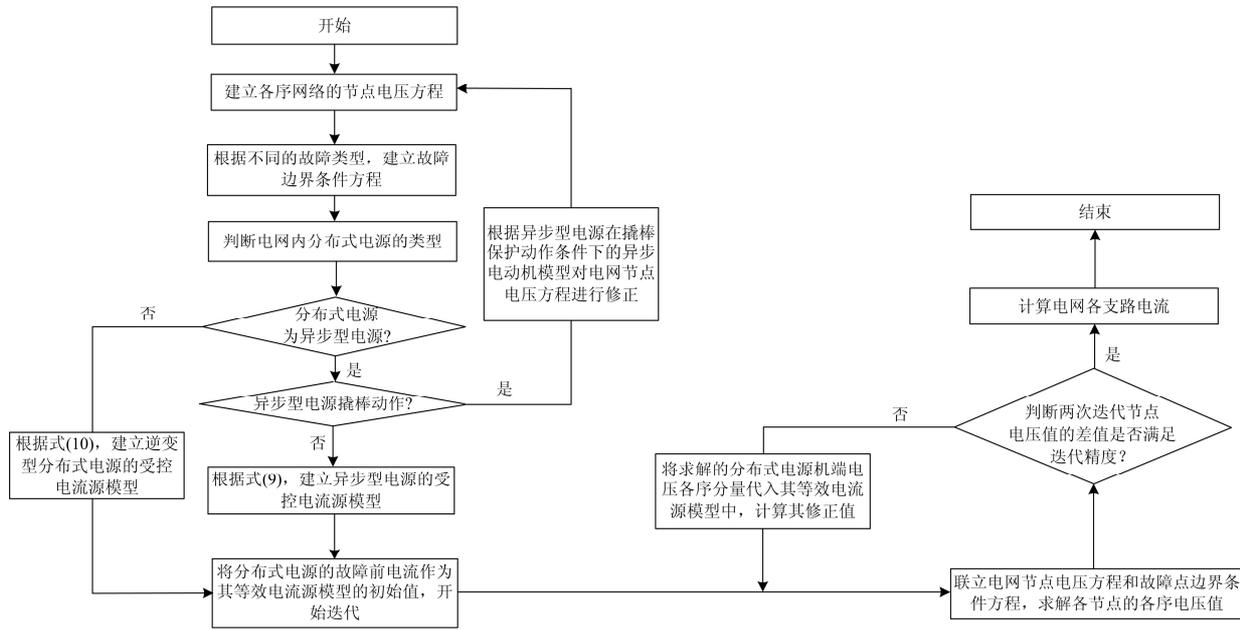


图 3 含多类分布式电源接入的电网故障分析方法

Fig. 3 Diagram of fault analysis method in power grid with DGs

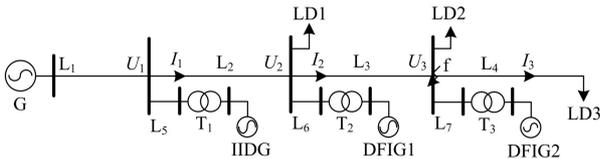


图 4 含多分布式电源接入的简单电网示意图

Fig. 4 Power system with penetration of DGs

在图 4 中, 假设在 f 点分别发生三相对称故障和 BC 两相相间故障。在电网短路时, 双馈风电机组的运行方式为: DFIG1 的转子侧变换器继续对 DFIG1 进行励磁调节, 而故障点附近的 DFIG2 的撬棒保护动作。

表 1 和表 2 给出的是图 4 中 f 点发生三相对称短路时, 主要支路电流和各节点电压计算值与仿真实测值的对比结果。表 3 和表 4 给出的是图 4 中 f 点发生 BC 两相故障时, 主要支路电流和各节点电压计算值与仿真实测值的对比结果。

表 1 f 点发生三相对称故障时支路电流比较

Table 1 Branch currents under three-phase fault occurs at f

变量	仿真值	计算值
$I_{IIDG}/kA$	$0.82 \angle -12.2^\circ$	$0.81 \angle -12.1^\circ$
$I_{DFIG1}/kA$	$0.78 \angle -43.7^\circ$	$0.79 \angle -43.5^\circ$
$I_{DFIG2}/kA$	$0 \angle /$	$0 \angle /$
$I_1/kA$	$16.4 \angle -66.1^\circ$	$16.4 \angle -66.3^\circ$
$I_2/kA$	$17.1 \angle -65.3^\circ$	$17.1 \angle -65.2^\circ$
$I_3/kA$	$0 \angle /$	$0 \angle /$

表 2 f 点发生三相对称故障时节点电压比较

Table 2 Node voltages under three-phase fault occurs at f

变量	仿真值	计算值
$U_{IIDG}/kV$	$0.28 \angle 6.2^\circ$	$0.28 \angle 6.1^\circ$
$U_{DFIG1}/kV$	$0.16 \angle 7.7^\circ$	$0.15 \angle 7.5^\circ$
$U_{DFIG2}/kV$	$0 \angle /$	$0 \angle /$
$U_1/kV$	$14.38 \angle 0.9^\circ$	$14.36 \angle 0.8^\circ$
$U_2/kV$	$7.34 \angle 1.2^\circ$	$7.33 \angle 1.2^\circ$
$U_3/kV$	$0 \angle /$	$0 \angle /$

由表 1 至表 4 可知, 在电网故障条件下, 各支路电流计算值和仿真值之间的最大幅值误差为 2.5%, 最大角度误差为 0.5%; 各节点电压计算值和仿真值之间的最大幅值误差为 2.7%, 最大角度误差为 0.4%。综上可知, 无论电网发生对称还是不对称故障, 本文提出的含不同类型分布式电源接入的电网短路计算方法均具有较高的计算精度, 可以满足电网故障分析和继电保护整定计算的应用要求。

需要指出的是, 分布式电源接入容量及低电压穿越策略对电网继电保护整定有重要影响。特别是异步型电源撬棒保护的的动作行为特征, 将使得传统保护整定中采用的电网运行方式和计算方法并不适用, 需要研究新的电网继电保护整定原则和计算方法。对此, 作者将另撰文进行分析。

表 3 f 点发生 BC 两相相间故障时支路电流比较

Table 3 Branch currents on condition that two-phase fault occurs at f

变量	$I_{IDG}/kA$		$I_{DFIG1}/kA$		$I_{DFIG2}/kA$		$I_1/kA$		$I_2/kA$		$I_3/kA$	
	正序	负序	正序	负序	正序	负序	正序	负序	正序	负序	正序	负序
仿真值	0.79∠ -4.55°	0.002∠/	0.7∠ -22.1°	0.001∠ /	0.09∠ 94.7°	0.12∠ 120.7°	10.77∠ -66.7°	5.66∠ 114.3°	11.26∠ -64.9°	5.68∠ 114.6°	0.078∠ -18.6°	0.079∠ -18.9°
计算值	0.79∠ 4.5°	0.000	0.7∠ -22.1°	0.000	0.09∠ 95.1°	0.12∠ 120.5°	10.7∠ -66.4°	5.66∠ 114.3°	11.3∠ -64.3°	5.68∠ 114.5°	0.08∠ -18.8°	0.08∠ -18.8°

表 4 f 点发生 BC 两相相间故障时节点电压比较

Table 4 Node voltages on condition that two-phase fault occurs at f

变量	$U_{IDG}/kV$		$U_{DFIG1}/kV$		$U_{DFIG2}/kV$		$U_1/kV$		$U_2/kV$		$U_3/kV$	
	正序	负序	正序	负序	正序	负序	正序	负序	正序	负序	正序	负序
仿真值	0.33∠ 5.7°	0.05∠ -0.3°	0.24∠ 6.9°	0.09∠ -0.8°	0.13∠ 0.9°	0.13∠ -0.3°	16.8∠ 1.1°	2.4∠ 0.9°	12.1∠ 1.6°	4.9∠ 1.0°	7.3∠ 1.1°	7.3∠ 0.9°
计算值	0.34∠ 5.4°	0.05∠ 0.4°	0.24∠ 6.5°	0.09∠ 0.4°	0.13∠ 0.8°	0.13∠ 0.1°	16.8∠ 1.0°	2.5∠ 0.8°	12.4∠ 1.5°	4.9∠ 1.1°	7.5∠ 1.5°	7.3∠ 1.1°

## 4 结论

针对传统故障计算方法难以满足含分布式电源接入的电网故障分析需求的难题, 本文建立了不同类型分布式电源的短路计算模型。在此基础上, 提出了适应不同类型分布式电源接入的电网故障分析方法。最后, 通过仿真分析验证了所提方法的正确性。主要结论如下。

(1) 双馈机组(异步型电源)的短路计算模型与撬棒保护动作情况有关。当撬棒保护动作时, 双馈机组的短路计算模型可用异步电动机模型表征。当撬棒保护不动作时, 其短路计算模型可用受控电流源模型等值。逆变型电源的短路计算模型与撬棒保护不动作时的双馈机组类似, 也可等效为受控的电流源。

(2) 分布式电源在电网不对称故障条件下存在多种控制策略, 其对分布式电源的故障电流有重要影响。因此, 需根据分布式电源所采用的控制策略确定其等效受控电流源的类型和参数。

(3) 分布式电源的短路计算模型与同步发电机模型存在较大差异, 传统电网短路计算方法不再适用。此外, 当分布式电源短路计算模型用受控电流源模型等值时, 难以直接得到其解析解, 需要联立受控电流源模型方程、电网节点电压方程和故障边界条件方程进行迭代求解。

(4) 仿真结果表明, 本文提出的分布式电源短路计算模型和电网故障计算方法精度较高, 可满足含不同类型分布式电源接入的电网短路计算和保护整定计算的应用要求。

## 参考文献

- [1] 翦志强, 司徒琴. 三相电压不对称跌落光伏并网逆变器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 126-130.  
JIAN Zhiqiang, SITU Qin. Control method of photovoltaic grid-connected inverter under three-phase voltage unbalanced dips[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 126-130.
- [2] 陶以彬, 李官军, 柯勇, 等. 微电网并/离网故障特性和继电保护的配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 95-100.  
TAO Yibin, LI Guanjun, KE Yong, et al. Research on the fault characteristics and relay configuration of micro-grid in the grid and off-grid mode[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 95-100.
- [3] 韩奕, 张东霞. 含逆变型分布式电源的微网故障特征分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 147-152.  
HAN Yi, ZHANG Dongxia. Fault analysis of microgrid composed by inverter-based distributed generations[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 147-152.
- [4] 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.
- [5] PLET C A, BRUCOLI M, MCDONALD J D F, et al. Fault models of inverter-interfaced distributed generators: experimental verification and application to fault analysis [C] // Proceedings of 2011 IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, CA, USA, 2011.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] 沈浩然, 张建华, 丁磊, 等. 双馈异步发电机单相接地故障瞬态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 6-11. SHEN Haoran, ZHANG Jianhua, DING Lei, et al. Transient characteristic research of doubly-fed induction generator during single-phase grounding fault[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 6-11.
- [9] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩, 等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62. QI Shangmin, LI Fengting, HE Shien, et al. Research on fault characteristics of grid-connected large scale wind farms with LVRT capability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 55-62.
- [10] 赵霞, 王倩, 邵彬, 等. 双馈感应风力发电系统低电压穿越控制策略研究及其分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 57-64. ZHAO Xia, WANG Qian, SHAO Bin, et al. Low voltage ride through control strategy and its analysis of doubly fed induction generator[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 57-64.
- [11] SULLA F, SVENSSON J, SAMUELSSON O. Symmetrical and unsymmetrical short-circuit current of squirrel-cage and doubly-fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2011(81): 1610-1618.
- [12] 徐殿国, 王伟, 陈宁. 基于撬棒保护的双馈电机风电场低电压穿越动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 20(22): 29-36. XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 20(22): 29-36.
- [13] XIANG D, LI R. Control of a doubly fed induction generator in a wind turbine during grid fault ride-through[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 652-662.
- [14] 熊小伏, 欧阳金鑫. 电网短路时双馈感应发电机转子电流的分析与计算[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 114-121. XIONG Xiaofu, OUYANG Jinxin. Analysis and calculation of rotor currents for doubly-fed induction generators under short circuits in power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 114-121.
- [15] KANELLOS F D, KABOURIS J. Wind farms modeling for short-circuit level calculations in large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1687-1695.
- [16] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及撬棒保护影响的双馈风力发电机组故障电流特性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 1-10. KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering impact of crowbar protection[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 1-10.
- [17] KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. Fault current study of wind turbine driven DFIG with crowbar protection[J]. Elektrotehniški Vestnik, 2014, 81(12): 57-63.
- [18] KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Study of fault current characteristics of DFIG considering dynamic response of RSC[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 26(2): 278-287.
- [19] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 计及励磁调节特性影响的双馈风力发电机组故障电流特性[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 256-265. KONG Xiangping, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Fault current characteristics of DFIG considering excitation and regulation characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 256-265.
- [20] XIAO Fan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen. fault current characteristics of the dfig under asymmetrical fault conditions[J]. Energies, 2015, 8(10): 1071-1092.
- [21] 国家电网公司. GB/T 19963-2011 风电场接入电力系统技术规定[S]. 2011. State Grid Corporation of China. GB/T 19963-2011 technical rule for connecting wind farm to power

- system[S]. 2011.
- [22] 胡胜, 林新春, 康勇, 等. 一种双馈风力发电机在电网电压不平衡条件下的改进控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 21-29.  
HU Sheng, LIN Xinchun, KANG Yong, et al. An improved control strategy of doubly-fed induction generator under grid voltage unbalance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 21-29.
- [23] HU Jiabing, HE Yikang. Modeling and enhanced control of DFIG under unbalanced grid voltage conditions[J]. Electric Power Systems Research, 2009, 79(2): 273-281.
- [24] 郑艳文, 李永东, 柴建云, 等. 不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 89-93.  
ZHENG Yanwen, LI Yongdong, CHAI Jianyun, et al. Research on control strategy for doubly-fed generation system under unbalanced voltage condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 89-93.
- [25] CHEN Sizhe, CHEUNG N C, WONG K C, et al. Integral sliding-mode direct torque control of doubly-fed induction generators under unbalanced grid voltage[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(2): 356-368.
- [26] 王宏胜, 章玮, 胡家兵, 等. 电网电压不对称故障条件下DFIG风电机组控制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(4): 97-102.  
WANG Hongsheng, ZHANG Wei, HU Jiabing, et al. A control strategy for doubly-fed induction generator wind turbines under asymmetrical grid voltage conditions caused by faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(4): 97-102.
- [27] 胡家兵, 贺益康, 王宏胜. 不平衡电网电压下双馈感应发电机网侧和转子侧变换器的协同控制[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(9): 97-104.  
HU Jiabing, HE Yikang, WANG Hongsheng. Coordinated control of grid- and rotor-side converters of doubly-fed induction generator under unbalanced network voltage conditions[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(9): 97-104.
- [28] 孔祥平, 张哲, 尹项根, 等. 含逆变器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.
- [29] YANG Zengli, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A novel fault-analysis method for the power grid with inverter-interfaced distribution generators[J]. Journal of Electrical Engineering and Computer Science, 2015, 32(14): 214-223.

---

收稿日期: 2015-04-31

作者简介:

尹项根(1954-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护及安全自动控制, 光电及电力电子应用技术; E-mail: xgyin@mail.hust.edu.cn

张哲(1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力系统继电保护、电力设备监录技术、新能源以及超导电力新技术等; E-mail: zz\_mail2002@163.com

肖繁(1989-), 男, 博士研究生, 研究方向为应对分布式电源大规模接入的电力系统继电保护及安全控制。E-mail: xiao103fan@163.com

(编辑 魏小丽)