

感应发电机接入配电网的不对称短路电流峰值评估

陈旭¹, 周念成², 王强钢², 杨继旺³, 熊希聪², 文旭⁴

(1. 华南理工大学广东省绿色能源技术重点实验室 广州 510640;

2. 重庆大学输电装备及系统安全与新技术国家重点实验室 重庆 沙坪坝区 400044;

3. 广东电网公司珠海供电局 广东 珠海 519000; 4. 国网重庆市电力公司电力科学研究院 重庆 江北区 401123)

【摘要】 短路电流计算是分布式发电接入配电网规划和保护的基础。研究了感应发电机(IG)的不对称故障暂态特性, 推导配电网不对称故障时IG定子短路电流的解析式。由于配电网不同位置发生短路故障时, 故障瞬间电压相位变化和发电机转速在故障过程中快速上升, 都将对IG注入电网的短路电流产生影响。在计及配电网不对称故障后IG转子转速变化的同时, 利用转子运动方程和正负序静态等值电路, 得到了估计电网发生故障后IG的短路冲击电流算法, 最后利用电磁暂态分析软件中IG的5阶动态模型仿真验证该方法的正确性。

关键词 配电网; 故障初始时刻; 感应发电机; 短路电流峰值; 不对称故障

中图分类号 TM913

文献标志码 A

doi:10.3969/j.issn.1001-0548.2014.05.013

Evaluation of Asymmetric Short Circuit Current Peak for Induction Generator Integrated into Distribution Network

CHEN Xu¹, ZHOU Nian-cheng², WANG Qiang-gang², YANG Ji-wang³, XIONG Xi-cong², and WEN Xu⁴

(1. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, South China University of Technology Guangzhou 510640;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University Shapingba Chongqing 400044;

3. Zhuhai Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Corporation Zhuhai 519000;

4. Chongqing Electric Power Research Institute, State Grid Chongqing Electric Power Company Jiangbei Chongqing 401123)

Abstract The short circuit current calculation is an important foundation for planning and protection of distribution grid with distributed generation. The transient characteristics of induction generator (IG) are investigated when the unsymmetrical fault occurs in the distribution network, and the analytic formula of its stator current under unsymmetrical short circuit is derived. The impact of an IG rotor speed and the fault initial time (or phase) to the short circuit current under unsymmetrical fault are studied when the short circuit occurs. According to the equation of rotor motion and its steady-state circuits in the positive and negative sequence component networks, an evaluation method to determine the current peak of unsymmetrical short circuit for an IG in distribution grid is proposed by considering its rotor speed variations. The correctness of the method is verified by using the fifth electromagnetic transient model of IG in PSCAD/EMTDC simulation software.

Key words distribution network; fault initial time; induction generator; short circuit peak current; unsymmetrical fault

分布式发电(distributed generation, DG)在电网短路时的注入电流会改变保护装置的动作特性, 由于绕组结构简单、体积小、重量轻等优势, 在已经接入配电网的DG中更多采用感应发电机(induction generator, IG)^[1-3]。短路计算是IG接入配电网规划和保护的基础, 特别在电气设备动稳定性校验时须确定IG的短路冲击电流^[3]。为了确保配电网中断路器遮断容量的合理配置, 须对电网故障后IG的短路电

流峰值进行估算。

由于发电机定子绕组磁链守恒, IG定子磁链将在电网发生短路故障后出现衰减的直流分量, 导致定子短路电流产生暂态直流上升, 还会通过定子和转子的磁路交链, 在转子绕组感应出衰减的周期电流。文献[4]分析了电网短路后IG的电磁暂态响应过程, 但给出的定子电流直流分量衰减时间常数, 没有考虑网络阻抗的作用。另外, 在ANSI Std C37等

收稿日期: 2013-08-10; 修回日期: 2014-02-28

基金项目: 国家自然科学基金(51277184)

作者简介: 陈旭(1976-), 男, 博士生, 高级工程师, 主要从事电力系统规划研究与管理方面的研究。

短路计算标准中对于IG的短路冲击电流均采用校正系数法, 未计及电机电磁暂态仍有显著误差^[5]。设故障中转子转速不变, 文献[6]推导了IG三相短路电流表达式, 据此文献[7]提出IG三相短路电流峰值估算方法。针对不对称故障, 文献[8-11]推导了IG不对称短路电流表达式; 文献[12]考虑短路电流与电网交互作用, 给出IG短路电流周期分量的迭代算法, 但前述研究均未考虑故障中IG转速变化, 对于部分机组短路电流峰值的计算误差将大于10%。文献[3]提出了计及转速变化时IG三相短路电流峰值的计算方法, 但该方法仅针对三相短路故障, 无法估算不对称故障时IG的短路电流峰值。

电网不对称短路是IG的重要故障工况, 本文推导了配电网发生不对称故障时IG定子短路电流的解析式, 研究机组短路电流与电网故障瞬间的电压相位、发电机转速等因素的关系, 在此基础上, 考虑前述两个因素给出IG不对称短路电流峰值评估方法。该方法能有效计算IG接入配电网发生不对称故障时的短路电流相分量峰值。

1 感应发电机不对称短路电流计算

配电网不对称故障时, 仅有定子正序和负序电压使IG定子绕组产生强制正弦分量^[11]。忽略定子电阻^[8-12], 由定子电压方程可得故障后定子磁链强制正负序分量为 $\psi_{1s} = \dot{U}_{1s} e^{j\omega t} / j\omega$ 和 $\psi_{2s} = -\dot{U}_{2s} e^{-j\omega t} / j\omega$, 其中, ω 为电网同步转速, \dot{U}_{1s} 和 \dot{U}_{2s} 为故障后IG的正序和负序电压。不对称故障后, 定子绕组磁链将出现衰减直流分量, 以维持故障时的绕组磁链守恒。设定子、转子漏感和励磁电感为 L_{1s} 、 L_{1r} 和 L_m , 定子磁链直流分量的衰减时间常数为 T_s , 故障前IG接入点电压 $u_s = \dot{U}_s e^{j\omega t}$, 则不对称故障后定子磁链为^[11]:

$$\psi_s = \frac{\dot{U}_{1s}}{j\omega} e^{j\omega t} - \frac{\dot{U}_{2s}}{j\omega} e^{-j\omega t} + \left[\frac{\dot{U}_s}{j\omega} - \left(\frac{\dot{U}_{1s}}{j\omega} - \frac{\dot{U}_{2s}}{j\omega} \right) \right] e^{-t/T_s} \quad (1)$$

式中,

$$T_s = (L_s - L_m^2 / L_r) / (R_s + R_c)$$

$$L_s = L_{1s} + L_m + L_c, \quad L_r = L_{1r} + L_m$$

在计算定子磁链衰减时间常数时, 需考虑电网阻抗的影响, 将IG机端至接入点间变压器及线路的电阻 R_c 和电感 L_c , 追加至发电机的定子电阻和漏电感中。节点 i 的IG正序和负序静态等值电路如图1所示, 其机端至接入点的正、负序等效阻抗相等。根据图1可计算转子电流关于定子电流的表达式, 再结合 $\psi_s = L_{1s} i_s + L_m i_r$ 和 $\psi_r = L_m i_s + L_{1r} i_r$ 得到故障后磁链的稳态

响应即转子磁链的强制分量。其中 ψ_{1r} 和 ψ_{2r} 分别为:

$$\begin{cases} \psi_{1r} = \frac{L_m R_r / s \cdot \psi_{1s}}{L_s R_r / s + j\omega_s (L_s L_r - L_m^2)} = \eta_{1rs}(\omega_r) \psi_{1s} \\ \psi_{2r} = \frac{L_m R_r / (2-s) \cdot \psi_{2s}}{L_s R_r / (2-s) - j\omega_s (L_s L_r - L_m^2)} = \eta_{2rs}(\omega_r) \psi_{2s} \end{cases} \quad (2)$$

式中, R_r 为转子电阻; 转差 $s=1-\omega_r$, ω_r 为转子电角速度标么值。

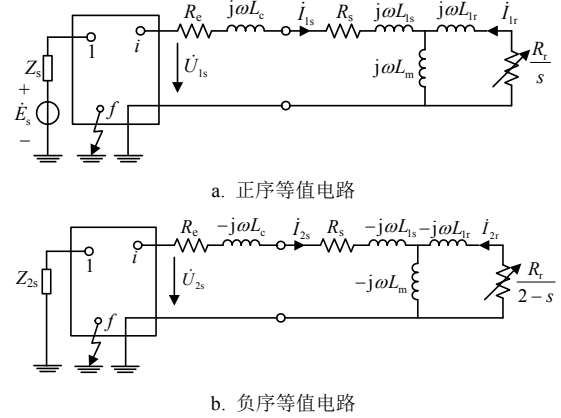


图1 配电网短路时正负序静态等值电路

由于IG转子电阻 R_r 很小, 不同转速下转子磁链负序分量系数 $\eta_{2rs}(\omega_r)$ 基本为0, 可忽略转子磁链负序强制分量。通过引入IG转子磁链正序分量系数 $\eta_{1rs}(\omega_r)$, 对文献[11]推导的IG不对称短路电流计算式进行改进。同样由故障时磁链守恒, 推导故障后定子坐标下的转子磁链为:

$$\psi_r = \eta_{1rs}(\omega_r) \frac{\dot{U}_{1s}}{j\omega_s} e^{j\omega t} + \eta_{1rs}(\omega_{r0}) \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_{1s}}{j\omega_s} e^{-t/T_r} e^{j\omega_r t} \quad (3)$$

式中, ω_{r0} 为故障时发电机初始转速; $T_r = (L_r - L_m^2 / L_s) / R_r$ 为转子直流磁链的衰减时间常数。将式(1)和式(3)代入 $i_s = (L_r \psi_s - L_m \psi_r) / (L_s L_r - L_m^2)$ 得到故障后IG不对称短路电流空间矢量为:

$$i_s = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2} \left\{ [L_r - L_m \eta_{1rs}(\omega_r)] \frac{\dot{U}_{1s}}{j\omega} e^{j\omega t} + L_r \frac{\dot{U}_{2s}}{-j\omega} e^{-j\omega t} - L_m \eta_{1rs}(\omega_{r0}) \frac{\dot{U}_s - \dot{U}_{1s}}{j\omega_s} e^{-t/T_r} e^{j\omega_r t} \right\} + \frac{L_r}{L_s L_r - L_m^2} \times \left[\frac{\dot{U}_s}{j\omega} - \left(\frac{\dot{U}_{1s}}{j\omega} + \frac{\dot{U}_{2s}}{-j\omega} \right) \right] e^{-t/T_s} = A_1(\omega_r) e^{j[\omega t + \phi_1(\omega_r)]} + A_2 e^{-j(\omega t + \psi_2)} + A_3 e^{-t/T_r} e^{j(\omega_r t + \phi_3)} + A_4 e^{j\phi_4} e^{-t/T_s} \quad (4)$$

故障后发电机转子与定子绕组磁链的强制分量共同决定了IG短路电流的工频正序分量。由比例系数 $\eta_{1rs}(\omega_r)$ 与机组端电压的正序分量可得转子磁链强制分量, 而利用 $\eta_{1rs}(\omega_{r0})$ 与故障前后的机端电压则可计算转子磁链的暂态分量, 该转子磁链分量为交流分量, 相应的频率为转子转速频率。将式(4)电流空

间矢量变换后得到其不对称短路电流为:

$$\begin{aligned} i_s(t)|_{a,b,c} = & A_1(\omega_r) \cos \left[\omega t + \varphi_1(\omega_r) - (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \\ & A_2 \cos \left[\omega t + \varphi_2 + (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \\ & A_3 e^{-t/T_r} \cos \left[\omega_r \omega t + \varphi_3 - (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] + \\ & A_4 \cos \left[\varphi_4 - (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] e^{-t/T_s} \end{aligned} \quad (5)$$

式中, A_1 、 A_2 和 φ_1 、 φ_2 分别为IG不对称短路电流的工频正、负序周期分量的幅值和相位;而 A_3 、 A_4 和 φ_3 、 φ_4 分别为转速频率分量、直流分量的幅值和相位; $m=1,2,3$ 分别表示ABC三相电流。

2 感应发电机转速变化和故障初始时刻对不对称短路电流的影响

以额定功率3 MW定速IG^[12]为例, $U_N=0.69$ kV, $L_{is}=0.12$ pu, $L_{lr}=0.18$ pu, $f_N=50$ Hz, $R_s=0.004$ 8 pu, $R_r=0.004$ 3 pu, $L_m=6.77$ pu, 转动惯量 $H=5.04$ s, $R_e+jX_e=0.0125+j0.125$ pu, 输入转矩 $T_m=-1.0$ pu。配电网近端(与配电网连接点)发生BC两相短路时, IG短路电流瞬时值 I_{sabc} 、周期分量 I_s 及直流分量 I_{sdc} 有效值如图2所示。在 $t=4$ s接入点发生相间故障, 正序同步频率分量 $A_1(\omega_0)=0.72$ pu和 $\varphi_1(\omega_0)=-2.683$ rad, 负序电流分量 $A_2=1.45$ pu和 $\varphi_2=-1.571$ rad, 转子频率分量 $A_3=1.81$ pu和 $\varphi_3=1.905$ rad, 直流分量 $A_4=3.83$ pu和 $\varphi_4=-1.571$ rad。

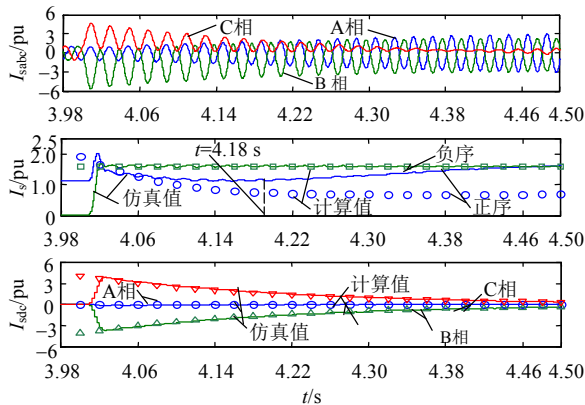


图2 配电网近端短路时IG两相短路电流

如图2所示, 随故障持续时间的增加, 正序周期分量中的转子频率部分逐渐衰减至0, 其还包含的另一部分工频分量则变化到稳态值。IG接入点相间短路时, 其故障电压正负序分量幅值相等, 在 $t=4.46$ s后短路电流正序和负序分量的稳态值相同。故障瞬间A相电压不发生变化, 对应短路电流直流分量为

0, BC两相直流分量幅值相等而符号相反。由于周期分量相位的影响, B相短路电流的峰值大小接近6.0pu高于其他两相电流。

设配电网故障后IG转速 ω_r 保持初始转速 ω_0 不变, 采用式(5)可计算近端短路时IG短路电流的周期和直流分量(图2), 其中正序周期分量计算值为同步频率 $A_1(\omega_r)\angle\varphi_1(\omega_r)$ 和转子频率 $A_3e^{-t/T_r}\angle\varphi_3$ 相量之和的模值。正序同步频率分量 $A_1(\omega_r)\angle\varphi_1$ 由定子和转子磁链产生的两部分组成, 式(4)中转子磁链对应的电流相量由 $\eta_{1rs}(\omega_r)$ 系数决定。图3给出了IG转子和定子磁链强制分量比例系数 $\eta_{1rs}(\omega_r)$ 和 $\eta_{2rs}(\omega_r)$ 随转速的变化特性, 可见 $A_1(\omega_r)\angle\varphi_1(\omega_r)$ 的转子磁链部分随转速增加逐渐衰减, 且由于两部分电流相量相位相反, 使得仿真结果中短路电流正序周期分量开始小幅减小, 而在 $t=4.18$ s后上升至稳态值。

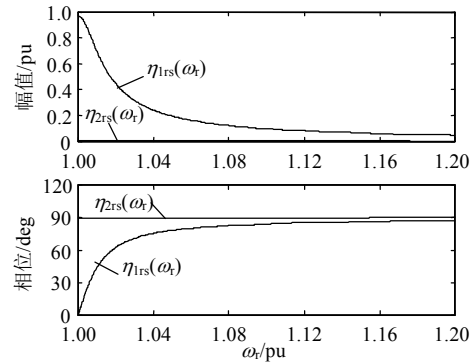
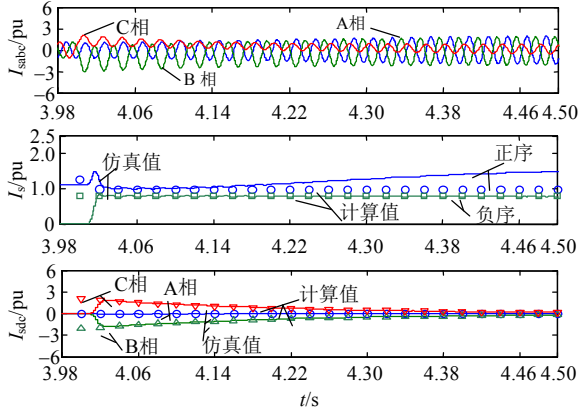


图3 磁链强制分量比例系数

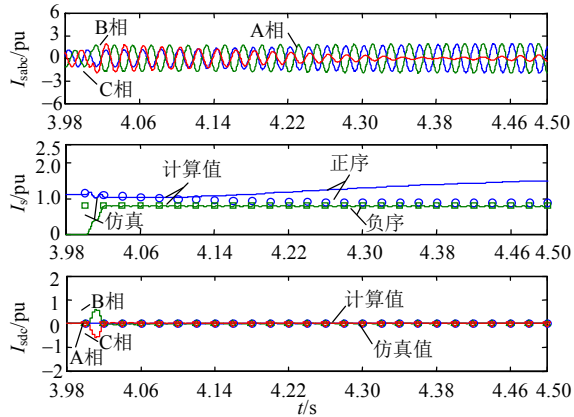
由图3还可知, 不同转速下转子和定子磁链负序分量的比例系数 $\eta_{2rs}(\omega_r)$ 幅值基本为0, 可见忽略转子磁链负序强制分量是可行的。图2中负序电流周期和直流分量均不受转子转速影响, 仅由故障前后电压决定, 计算结果与动态仿真结果一致。而正序电流周期分量计算结果与仿真结果不同, 原因在于其未考虑故障中IG的转速变化。根据 $\eta_{1rs}(\omega_r)$ 幅值和相位特性可知, IG转速小幅增加也将对转子磁链强制分量产生显著影响; 转子转速除了决定短路电流中同步周期分量幅值 A_1 外, 还将通过相位 φ_1 影响周期分量峰值出现时刻。

配电网远端不同时刻发生BC两相短路时, IG短路电流如图4所示, 在 $t=4$ s时故障前后电压 $\dot{U}_s=0.962$ pu、 $\dot{U}_{1s}=-0.627$ pu和 $\dot{U}_{2s}=0.312$ pu, 而在 $t=4.01$ s时 $\dot{U}_s=-0.962$ pu、 $\dot{U}_{1s}=-0.627$ pu和 $\dot{U}_{2s}=0.312$ pu。远端短路时电压跌落程度减小, 各短路电流均小于近端短路的情况。故障后IG端电压正序分量大于负序分量, 其正序电流周期分量稳态值大于负序分量。对

比图4a和4b可知, 由于故障前电压 \dot{U}_s 初始相位变化, 导致在 $t=4$ s 和 $t=4.01$ s 发生故障时直流分量幅值由 $A_4=2.87$ pu 变化至 $A_4=0.03$ pu, 因而图4b各相短路电流的直流分量几乎为0。故障发生时刻不同对周期分量幅值的影响较小, 但会改变短路电流周期分量的相位, 影响电流峰值出现时刻。计算IG不对称短路电流峰值时, 须考虑IG转速和故障时刻的影响。



a. 故障发生时间 $t=4$ s



b. 故障发生时间 $t=4.01$ s

图4 配电网远端短路时IG两相短路电流

3 感应发电机不对称短路电流峰值

3.1 不对称故障时发电机转速变化

由于IG注入配电网的短路电流相对于主网电源电流的比例很小, 因此采用文献[10]假设即故障短路时IG电压直接跌落至故障后的稳态值。当机械转矩不变时, 故障后IG转速发生失稳的临界转速为^[13]:

$$\omega_{crit} = 1 + \frac{R_r \sqrt{U_t^4 - 4\omega^2(L_t + L_r)^2 T_m^2 - 4R_t U_t^2 T_m}}{T_m [R_t^2 + \omega^2(L_t + L_r)^2]} \quad (6)$$

式中, U_t 和 $Z_t=R_t+j\omega L_t$ 为故障前IG转子侧开路时, 外部网络的开路电压和戴维南等值阻抗^[3,13]。电网故障清除后IG转速可恢复稳定的前提条件是转子转速不

能超过 ω_{crit} 。结合临界转速 ω_{crit} 和图1可计算故障后IG接入点的正负序电压 \dot{U}'_{1s} 和 \dot{U}'_{2s} , 进而得到不对称故障后的正负序电磁转矩分量为:

$$T'_e = T'_{1e} + T'_{2e} = \frac{R_r}{s} I_{11}^2 + \frac{R_r}{2-s} I_{22}^2 = \frac{R_r}{s} \frac{U_{11}^2}{(R_t + R_r/s)^2 + \omega^2(L_t + L_r)^2} + \frac{R_r}{2-s} \times \frac{U_{21}^2}{[R_t + R_r/(2-s)]^2 + \omega^2(L_t + L_r)^2} \quad (7)$$

将式(7)中 U_s 分别替换为 U_{1s} 和 U_{2s} 即可得到故障配电网中IG转子侧开路等效电压 U'_{1t} 和 U'_{2t} , 由于IG机端至接入点的正序等效阻抗相等, 使对应的正负序戴维南阻抗也相同。则发电机转速方程为:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T'_e - T_m) \quad (8)$$

当故障持续时间为 t 时发电机转速为:

$$\omega_r(t) = \frac{1}{2H} \int_{t_0}^t T'_e(t) dt - \frac{T_m}{2H} (t - t_0) \quad (9)$$

式中, 故障发生瞬间 $t=t_0$ 。采用前向欧拉法求解得到转速迭代计算式为:

$$\omega_r(t_k) = \omega_r(t_{k-1}) + \frac{\Delta t}{2H} \{T'_e(t_{k-1}) - T_m\} \quad (10)$$

故障后IG电磁转矩 T'_e 动态变化与转速相关, 须迭代计算发电机转速, 本文研究中选择工频周期 $T=2\pi/\omega$ 的 $1/K$ 作为迭代步长 Δt , 且 $K=20$ 。

3.2 不对称短路电流峰值时刻

根据式(5)得到IG不对称短路电流周期分量的波峰出现时刻, 与其峰值时刻保持一致。若发电机转子转速在第 n 个 T 内恒定, 即为,

$$\omega_m = \sum_{k=(n-1)K+1}^{nK} \frac{\omega_r(t_k)}{K} \quad n=1, 2, 3, \dots \quad (11)$$

此时, IG不对称短路电流的周期分量为:

$$i_{sn}(t)|_{A,B,C} = A_1(\omega_m) \cos \left[\omega t + \varphi_1(\omega_m) - (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] + A_2 \cos \left[\omega t + \varphi_2 + (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] + A_3 e^{-t/T_r} \times \cos \left[\omega_m \omega t + \varphi_3 - (m-1) \frac{2\pi}{3} \right] \quad (n-1)T < t \leq nT \quad (12)$$

令上式周期分量的微分式等于0, 可得其极大值和极小值点的出现时刻。假设发电机转速 ω_m 和配网故障前后电压均为已知值, 则通过式(13)求出不对称短路电流的极大值时间 t_{i1n} 和极小值时间 t_{i2n} , 其中 i 取为A、B、C表示三相电流, 最后结合直流分量得到不同周期的短路电流峰值。

$$\begin{aligned}
 & A_1(\omega_m)\omega\sin\left[\omega t + \varphi_1(\omega_m) - (m-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \\
 & A_2\omega\sin\left[\omega t + \varphi_2 + (m-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \\
 & A_3e^{-t/T_r}\left\{\frac{1}{T_r}\cos\left[\omega_m\omega t + \varphi_3 - (m-1)\frac{2\pi}{3}\right] + \right. \\
 & \left. \omega_m\omega\sin\left[\omega_m\omega t + \varphi_3 - (m-1)\frac{2\pi}{3}\right]\right\} = 0 \quad (13)
 \end{aligned}$$

4 仿真分析

图5为IG接入配电网的结构图，将文献[7]中不同容量的IG接入网络进行测试，通过提出的方法计算各机组的不对称故障短路电流峰值，再将IG电磁暂态仿真结果与计算结果进行对比分析。

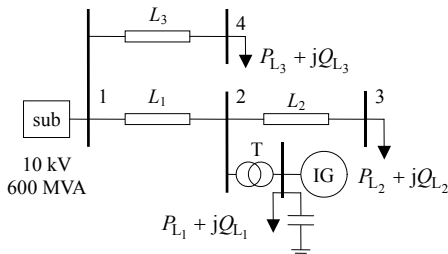
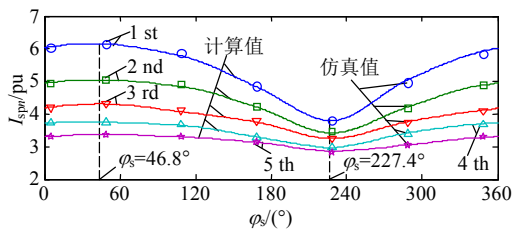


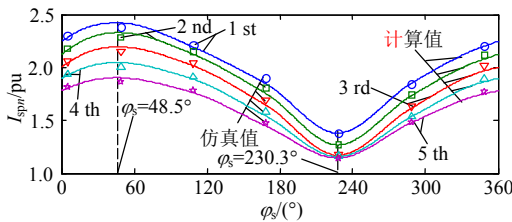
图5 IG接入配电网示意图

4.1 不同故障时刻的短路电流峰值

配电网故障发生时刻的不同将使IG端电压的初始相位发生变化，进而影响其不对称短路电流的直流分量大小以及周期分量峰值出现的时刻。以额定容量为4.5 MVA的#15机组为例，通过设置不同的故障发生时刻，使IG故障前电压的相位 φ_s 在 $0\sim 360^\circ$ 之间变化，可得图6所示的IG不对称短路电流前5个峰值与故障初始相位 φ_s 之间的关系。



a. 节点2两相短路(近端短路)



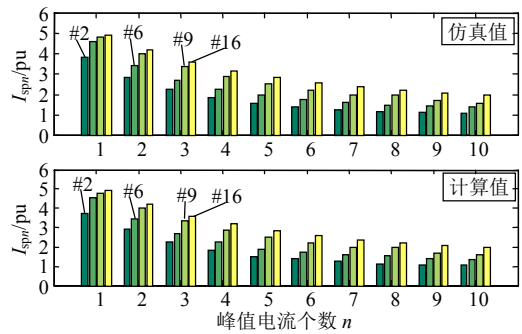
b. 节点4两相短路(远端短路)

图6 IG两相短路电流峰值随故障初始相位的变化特性

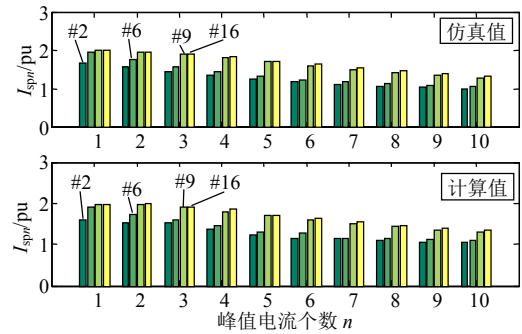
由图可知，IG短路电流峰值随初始相位呈周期性变化，且前5个电流峰值的变化趋势基本一致。图中给出节点2和节点4故障的IG短路电流峰值，两种情况在 $\varphi_s=46.8^\circ$ 和 $\varphi_s=48.5^\circ$ 出现最大值，而又在 $\varphi_s=227.4^\circ$ 和 $\varphi_s=230.3^\circ$ 出现最小值。比较图6中计算结果和仿真结果可知，本文方法的不同时刻发生故障的短路电流峰值，与仿真结果基本相同。

4.2 不同容量机组的短路电流峰值

为分析不同容量IG的短路电流峰值特点，设配电网在 $t_0=4$ s发生故障，可得4台不同容量IG的两相短路电流峰值计算结果如图7所示。由图可知，计算结果与仿真的机组电流峰值基本相同，本文算法能准确计算不同容量IG的不对称短路电流峰值。在图7中4台机组的容量从左至右逐渐增大，对应的不对称短路电路峰值也随之增加。



a. 节点2两相短路(近端短路)



b. 节点4两相短路(远端短路)

图7 不同容量IG两相短路电流峰值

由式(5)可知，远端故障时IG不对称短路电流包含3个部分的暂态衰减分量，以及故障后正负序端电压确定的同步频率稳态电流。结合图3发现，3个暂态分量中衰减最慢的是由发电机时间常数决定的正序同步频率分量，然后是转子频率周期分量，衰减最快的是直流分量。当故障持续时间增加后，转子磁链强制分量将伴随转速的大幅增加而减小至0，此时故障后定子磁链强制分量将决定IG的稳态不对称短路电流。图8中节点4两相短路时，IG稳态不对称

短路电流峰值依旧大于1pu(即机组额定电流峰值)。

此外, 图8显示了文献[7]中不同型号典型IG机组的短路电流计算值的散点图, 对其进行拟合可得到IG短路电流随容量变化大致趋势。可见IG短路电流峰值趋于饱和的机组容量区间为2.5~3.5 MVA, 该区间之前的短路电流峰值随着机组容量的增大而增大, 之后的短路电流峰值则有小幅减小。

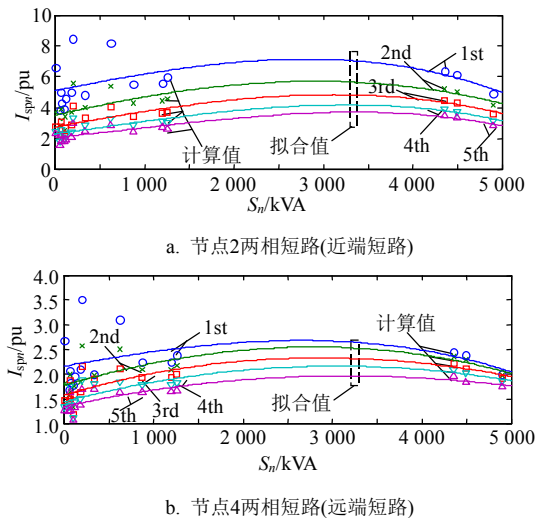


图8 IG两相短路电流峰值随机组容量的变化特性

5 结论

本文提出IG接入配电网的不对称短路电流峰值评估算法, 研究表明IG不对称短路电流直流分量衰减最快, 且受配电网故障发生时刻影响显著; 由转速变化决定的正序同步频率暂态分量衰减最慢, 衰减速度介于二者之间的是转速频率暂态分量。本文利用电磁暂态仿真软件, 针对不同型号IG机组接入配电网的案例, 验证本文提出的算法, 结果表明其能有效地计算配电网不同节点故障、不同故障发生时刻和不同容量IG机组的短路电流峰值。

参考文献

- [1] 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.
- [2] AKHMATOV V. Induction generators for wind power[M]. Essex: Multi Science Press, 2007.
- [3] 王达达, 张少泉, 陈晓云, 等. 感应发电机接入配网的三相短路电流峰值评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 25-31.
WANG Da-da, ZHANG Shao-quan, CHEN Xiao-yun, et al. Evaluation of current peak of three-phase short circuit for

- induction generator integrated into distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 25-31.
- [4] FITZGERALD A E, KINGSLEY C, UMANS S D. Electric machinery[M]. New York: McGraw-Hill Press, 2003.
- [5] BOUTSIKA T N, PAPATHANASSIOU S A. Short-circuit calculations in networks with distributed generation[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(7): 1181-1191.
- [6] VICATOS M S, TEGOPOULOS J A. Transient state analysis of a doubly-fed induction generator under three phase short circuit[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(1): 62-68.
- [7] SULAWA T, ZABAR Z, CZARKOWSKI D, et al. Evaluation of a 3- ϕ bolted short-circuit on distribution networks having induction generators at customer sites[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1965-1971.
- [8] 欧阳金鑫, 熊小伏, 张涵轶. 电网短路时并网双馈风电机组的特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 17-25.
OUYANG Jin-xin, XIONG Xiao-fu, ZHANG Han-yi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(22): 17-25.
- [9] 欧阳金鑫, 熊小伏. 接入配电网的双馈风力发电机短路电流特性及影响[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(23): 106-110, 123.
OUYANG Jin-xin, XIONG Xiao-fu. Characteristics of short circuit current of wind turbine driven DFIG and its impacts on grid connected distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(23): 106-110, 123.
- [10] LÓPEZ J, GUBÍA E, SANCHIS P, et al. Wind turbines based on doubly fed induction generator under asymmetrical voltage dips[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2008, 23(1): 321-330.
- [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(7): 1610-1618.
- [12] 周念成, 罗艾青, 王强钢, 等. 含多感应发电机的配电网短路计算对称分量法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(11): 65-70.
ZHOU Nian-cheng, LUO Ai-qing, WANG Qiang-gang, et al. Symmetrical components method for short-circuit current calculation of induction generators in distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(11): 65-70.
- [13] 周念成, 王强钢, 王鹏. 含多感应发电机配电网的暂态稳定研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(16): 40-47.
ZHOU Nian-cheng, WANG Qiang-gang, WANG Peng. Transient stability of distribution network with induction generators[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2011, 31(16): 40-47.