

计及不同电网电压跌落程度的双馈风电机组定子电流分析

郑涛, 李娟, 杨国生

(新能源电力系统国家重点实验室, 华北电力大学, 北京 102206)

摘要: 双馈风电机组在机端电压跌落程度不同的情况下会表现出不同的暂态特性, 随着风电机组的大规模并网, 其故障暂态特性对于电网的安全稳定运行具有重要意义。以对称故障为例, 基于双馈感应发电机的转子电压方程, 采用统一方法分析了电网故障导致的不同机端电压跌落程度下双馈风电机组的定子电流。在机端电压严重跌落时, 分析并推导了投入撬棒保护电路情况下双馈感应发电机定子电流的表达式。而在机端电压非严重跌落时, 在考虑转子侧变流器控制系统对定子电流的影响的基础上, 定性分析了双馈感应发电机定子电流动态变化过程。通过仿真进一步分析了机端电压不同跌落情况下定子电流的变化规律并且验证了所推导表达式的正确性。

关键词: 双馈风电机组; 对称故障; 撬棒保护; 控制系统; 定子电流

Stator current analysis of doubly-fed induction generators considering different grid voltage dip levels

ZHENG Tao, LI Juan, YANG Guo-sheng

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Doubly-fed induction generators (DFIG) has different transient characteristics under different generator terminals voltage dip levels. The analysis of the fault transient characteristics is very important to the grid security and stability against the background of large-scale wind generation on power grid. This paper takes asymmetrical voltage sag occurred at the terminal as an example. Based on the rotor voltage equations, the doubly-fed wind power generator fault current is analyzed under different generators terminal voltage drop levels in unified method. In the case of severe voltage drops in generator terminals, the transient characteristics are analyzed considering the crowbar protection insertion. If the terminal voltage drops mildly, the solution of limiting and calculating the short-current has to consider the influence of the control system and the stator current dynamic process is analyzed qualitatively based on the control system. Finally the paper further analyses stator current variation under different terminals voltage dip levels and validates the short-circuit expressions by simulations.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (863 Program) (No. 2012AA050208).

Key words: doubly-fed induction generators (DFIG); symmetrical fault; crowbar protection; control system; stator current

中图分类号: TM31 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)01-0081-07

0 引言

双馈风力发电机组 (Doubly-fed Induction Generators, DFIG) 发电效率高、功率变流器容量小、投资省, 能在较宽的范围内进行变速运行, 并且可以通过有功、无功的解耦控制调节功率因数, 目前已被广泛应用于风力发电领域^[1]。但是双馈风电机组转子侧通过交-直-交变流器与电网相连, 并且变

流器的容量较小, 其故障暂态特性十分复杂, 很容易导致双馈电机定、转子绕组出现大电流, 损坏变流器甚至造成风电机组脱网运行。随着电力系统中的风电机组装机容量的迅速增加, 掌握电网故障时双馈风电机组的故障特性及其分析方法具有十分重要的意义^[2]。

双馈风电机组对于电网故障引起的电压跌落十分敏感, 机端电压跌落的严重程度不同, 双馈风电机组会采取不同的保护策略^[3]: 1) 当电网故障引起机端电压严重跌落时, 由于转子侧过电压, 双馈风电机组一般采用转子侧快速投入撬棒保护装置的方

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2012AA050208)

法, 以避免大电流损害变流器功率器件, 从而导致的双馈风电机组脱网运行; 2) 当电网故障引起机端电压非严重跌落时, 应考虑通过改进双馈风电机组的控制策略来实现双馈电机的不间断运行, 文献[4]表明采用考虑电网电压瞬态影响的控制策略可使双馈风电系统承受跌至 85% 的定子电压骤降而不停止运行, 文献[5]则表明故障过程中逆变型分布式电源的故障电流特性主要受其控制策略的影响。

由于双馈风电机组的暂态特性复杂, 并且在不同故障情况下的保护策略不同, 传统的同步发电机分析方法已经不适用于双馈风电机组。尽管已有诸多关于双馈风电机组的故障特性的研究, 但是大部分都是针对机端电压严重跌落时撬棒保护电路直接投入的情况。文献[6-9]推导了带有撬棒保护的双馈风电机组在发生故障时短路电流和电磁暂态特性。文献[10]在分析电机发生短路故障后撬棒保护投入期间电气量特性基础上, 给出了双馈电机投入撬棒后定转子电流峰值估算式。文献[11]分析了变流器输出对转子电流的影响, 并推导了电网对称短路和不对称短路时的转子电流表达式, 但只是在计及变流器调控的耦合影响下对故障特性的研究, 并未根据其在不同机端电压跌落情况采取的不同保护策略去分析双馈风电机组的暂态特性, 统一其研究方法, 从而能够在实际的风机故障特性研究中得到一种简单易行的短路电流解析方法。

本文针对由电网对称故障导致的不同机端电压跌落程度的情况, 基于双馈风电机组的转子电压方程, 采用统一的解析方法分析了考虑撬棒保护投入和考虑控制系统时双馈风电机组的故障暂态特性, 并且推导了相应的定子电流表达式, 应用时域仿真验证推导的正确性。本文所做分析和计算完善了双馈风电机组故障特性理论体系, 为涉及风电并网的继电保护整定提供了理论依据。以上文献对空载或接近同步转速情况下的双馈风电机组机端发生对称性短路时的暂态过程进行了相关分析, 对于在机端发生不对称故障时短路暂态过程的研究较少, 并且在分析转子磁链时都做了较多的简化。

1 双馈风电机组的数学模型

考虑到研究的暂态过程十分短暂, 定转子均采用电动机惯例, 在电网电压同步旋转坐标系(Synchronous Rotating Frame, SRF)下, 双馈风电机组的矢量模型为^[12]

$$\begin{cases} \vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + D\vec{\psi}_s + j\omega_1 \vec{\psi}_s \\ \vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + D\vec{\psi}_r + j\omega_s \vec{\psi}_r \\ \vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r \\ \vec{\psi}_r = L_m \vec{i}_s + L_r \vec{i}_r \end{cases} \quad (1)$$

式中: \vec{u}_s 、 \vec{i}_s 、 $\vec{\psi}_s$ 、 \vec{u}_r 、 \vec{i}_r 、 $\vec{\psi}_r$ 分别代表定、转子侧电压、电流、磁链的空间矢量; R_s 、 R_r 分别为定、转子侧的绕组; L_s 、 L_r 、 L_m 分别为定、转子侧的自感和互感; ω_1 为同步旋转角速度; ω_r 为转子角速度; ω_s 为转差角速度; s 为转差频率, $s = (\omega_1 - \omega_r)/\omega_1$ 。

考虑到研究的暂态过程很短, 转子转速不会变化很大, 所以, 在短路期间可不考虑转子的运动方程, 将转子转速视作恒定。

由式(1)可知, 由定子磁链和转子电流表示的转子磁链表达式为

$$\vec{\psi}_r = \frac{L_m}{L_s} \vec{\psi}_s + \frac{M}{L_s} \vec{i}_r \quad (2)$$

式中, $M = L_s L_r - L_m^2$ 。

将式(2)代入式(1)可得转子电压方程为

$$\frac{M}{L_s} D\vec{i}_r + (R_r + j\omega_s \frac{M}{L_s}) \vec{i}_r = \vec{u}_r - \vec{e}_1 \quad (3)$$

式中, \vec{e}_1 为反电动势, $\vec{e}_1 = \frac{L_m}{L_s} (D\vec{\psi}_s + j\omega_s \vec{\psi}_s)$ 。

由式(1)可知, 由定子磁链和转子电流表示的转子电流表达式为

$$\vec{i}_r = \frac{\vec{\psi}_s}{L_m} - \frac{L_r}{L_m} \vec{i}_s \quad (4)$$

将式(4)代入式(3), 可得转子电压方程为

$$\frac{M}{L_m} D\vec{i}_s + (-\frac{R_r L_s}{L_m} + j\omega_s \frac{M}{L_m}) \vec{i}_s = -\vec{u}_r + \vec{e}_2 \quad (5)$$

式中: \vec{e}_2 为反电动势; $\vec{e}_2 = \frac{L_r}{L_m} (D\vec{\psi}_s + \frac{R_r \vec{\psi}_s}{L_r} + j\omega_s \vec{\psi}_s)$ 。

由式(5)可以看出, 反电动势 \vec{e}_2 反映定子磁链对定子电流的影响, \vec{u}_r 为转子侧变流器输出电压, 反映转子侧变流器控制系统对定子电流的影响。

2 不同电网电压跌落程度下双馈风电机组定子电流分析

2.1 双馈风电机组故障过程分析

双馈风电机组结构及其转子侧撬棒保护电路如图 1 所示。

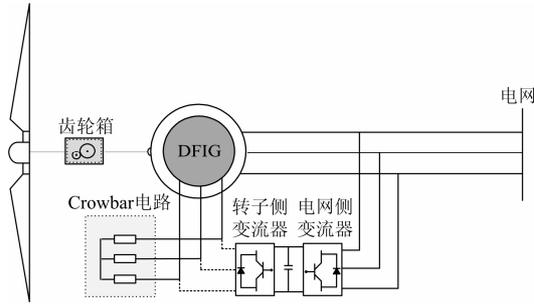


图1 双馈式风电机组及其转子侧撬棒保护电路

Fig. 1 DFIG with crowbar protection of the rotor-side converter

正常运行状态下, 双馈风电机组转子侧变流器可以提供足够大的励磁电压, 而当电网电压发生对称跌落时, 如果电网电压跌落程度不大, 故障后的最大转子电压幅值仍在转子侧变流器可输出的最大励磁电压范围内, 则双馈风电机组处于可控的运行状态, 此时可充分发挥双馈风电机组转子侧变流器的既定容量, 通过改善控制策略, 实现双馈风电机组的不脱网运行^[13]; 反之, 若电网电压跌落十分严重, 则双馈风电机组处于失控的运行状态, 由式(3)可知, 此时转子电压和反电动势的差值作用将在 R_r 上产生过电流, 其值很可能会超过转子变流器的电流限额, 会对转子侧的电力电子造成永久性损伤, 此时需增加转子侧变流器的容量, 或是在转子侧串入一定的电阻并与转子侧变流器并联, 即双馈风电机组的转子撬棒保护电路^[14], 以保证双馈风电机组的正常运行。

当电网发生短路时, 基于以上双馈风电机组采取的不同保护策略, 双馈风电机组的转子电压会随之发生变化, 式(5)已经建立了转子电压与定子电流的联系, 因此通过分析研究在不同电网电压跌落情况下的转子电压的变化即可知定子电流的动态特性。

假设 $t=0$ 时刻, 电网发生三相对称短路, 在同步旋转坐标系下, 短路前后双馈风电机组定子电压矢量为

$$\bar{u}_s = \begin{cases} \bar{u}_s, & t \leq 0 \\ k\bar{u}_s, & t > 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: \bar{u}_s 为故障前稳态电压; k 为电网发生短路后机端电压跌落程度。由于定子电阻较小, 忽略定子电阻。

根据磁链守恒定律, 机端电压跌落时, 定子磁链不能突变, 导致跌落电压在定子磁链中产生了正比于跌落电压的暂态衰减分量, 暂态衰减分量以定子衰减时间常数 T_s 衰减, 其中 $T_s = M/L_r R_s$, 则电网故障前后的定子磁链数学表达式为

$$\bar{\psi}_s = \begin{cases} \bar{u}_s, & t \leq 0 \\ \frac{k\bar{u}_s}{j\omega_1} + \frac{(1-k)\bar{u}_s}{j\omega_1} e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s}, & t > 0 \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)可以看出, 电网故障后的定子磁链可以分为两部分, 第一部分是故障后定子磁链稳态分量, 正比于故障后稳态机端电压, 第二部分为定子绕组中感应出的暂态衰减分量, 与机端电压跌落程度以及定子衰减时间常数有关, 幅值以 $1/T_s$ 作指数衰减, 振荡频率为 ω_1 。随着该磁链暂态分量的衰减, 定子磁链在达到新的稳态后, 仅与短路后的机端电压有关。

$t=0$ 时刻, 定子电流为

$$\bar{i}_s(0) = -\left(S/(3\bar{u}_s)\right)^* \quad (8)$$

式中: \bar{i}_s 为稳态运行时定子电流矢量; \bar{u}_s 为稳定运行时机端电压矢量; S 为风电机组输出的复功率; “*” 为共轭运算。

2.2 计及撬棒保护投入时双馈风电机组定子电流分析

假设 $t=0$ 时刻电网发生故障, 双馈风电机组机端电压出现严重对称跌落, 转子电压超过转子侧变流器可输出的最大励磁电压范围, 此时撬棒保护电路立即投入, 转子侧变流器停止工作, 双馈风电机组作异步运行。若将撬棒电阻等效为转子绕组的一部分, 则撬棒动作等效为转子绕组端口发生三相短路, 转子侧端口电压为零。同时转子侧电阻变为 R_r , $R_r = R_r + R_c$, 其中 R_c 为撬棒电阻。

考虑撬棒保护电路投入对定子电流的影响, 由于转子电压为零, 即转子侧变流器输出电压为零, 根据式(5)可得电网发生对称故障后的定子电流动态方程为

$$\frac{M}{L_m} D\bar{i}_s + \left(\frac{R_r L_s}{L_m} + j\omega_s \frac{M}{L_m}\right) \bar{i}_s = \bar{e}_2 \quad (9)$$

即

$$\frac{M}{L_m} D\bar{i}_s + \left(\frac{R_r L_s}{L_m} + j\omega_s \frac{M}{L_m}\right) \bar{i}_s = \frac{L_r}{L_m} (D\bar{\psi}_s + \frac{R_r \bar{\psi}_s}{L_r} + j\omega_s \bar{\psi}_s) \quad (10)$$

求解式(10), 可得电网发生对称短路后的定子电流为

$$\bar{i}_s = A_1 + B_1 e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_{r1}} + C_1 e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_{r1}} \quad (11)$$

式中, T_{r1} 为转子衰减时间系数, $T_{r1} = M/L_r R_r$ 。

根据式(11)可知, 定子短路电流中包含三种频率成分, 依次为直流分量、交流衰减分量和转差频率分量(在同步旋转坐标系下), A_1 、 B_1 、 C_1 分别为其对应分量的幅值, 其数值如附录 A 所示。若机端电压完全跌落时, 故障后定子电压为零, 定子电流中

只包含直流衰减分量和转差频率衰减分量, 不存在直流分量, 其中转差频率分量以 T_{r1} 快速衰减完, 交流衰减分量以 T_s 缓慢衰减直至为零。

2.3 计及控制系统影响时双馈风电机组定子电流分析

当电网故障引起机端电压出现非严重对称跌落时, 在转子变流器可控的条件下, 撬棒保护电路不需要动作, 可采取相应的控制策略使双馈风电机组承受该电压骤降而不脱网运行, 此时应在考虑变流器控制系统的情况下研究双馈风电机组的故障暂态特性(仅考虑转子侧变流器的影响)。

控制系统的调控作用最终都是通过作用在转子侧变流器上的转子电压来实现, 所以必须建立定子电流与转子电压之间的关系, 如式(5)和图 2(虚线框图内)所示。由式(5)和图 2 可以看出, 定子电流的变化由定子磁链以及转子侧变流器输出电压即转子侧变流器共同决定。

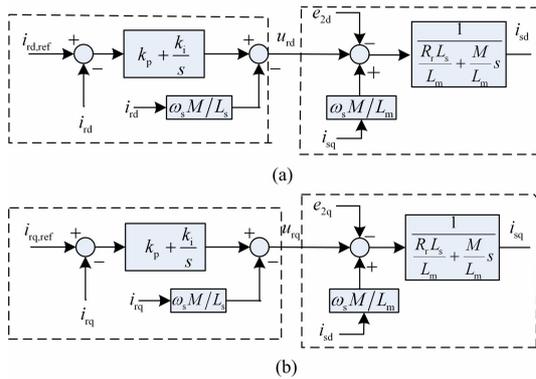


图 2 转子侧变流器控制回路
Fig. 2 Control of rotor-side converter

图 2 中, $i_{rd,ref}$ 、 $i_{rq,ref}$ 分别为转子 d、q 轴电流分量的参考值, 由有功、无功功率的参考值决定。 u_{rd} 、 u_{rq} 分别为跟踪转子电流所需要的转子电压参考值。

在转子保护未投入时, 故障过程中需要依靠转子侧变流器的控制系统来调整转子电压, 图 2 的左侧框图为转子侧变流器的电流内环控制回路。转子侧变流器控制通常采用定子磁场定向的矢量控制方法^[15], 通过比例积分控制器实现闭环运算, 以实现机组输出功率的解耦控制, 有功功率和无功功率分别由同步旋转坐标系内的转子电流 q 轴分量和 d 轴分量决定。功率作为变流器外环控制的反馈值, 经过 PI 计算后得到转子电流指令值的 d-q 轴分量。转子电流指令值再经过内环电流控制得到转子电压指令值。

因此, 由图 2 可得转子侧输出的转子电压方程为

$$\vec{u}_r = k_p(\vec{i}_{r,ref} - \vec{i}_r) + k_i \int (\vec{i}_{r,ref} - \vec{i}_r) dt + j\omega_s \frac{M}{L_s} \vec{i}_r \quad (12)$$

式中: k_p 、 k_i 分别为 PI 控制器的比例常数和积分常数; $\vec{i}_{r,ref}$ 为转子电流的参考值矢量。

将式(4)代入式(12), 可得

$$\vec{u}_r = k_p \vec{i}_{r,ref} + \left(\frac{k_p L_s}{L_m} - j\omega_s \frac{M}{L_m}\right) \vec{i}_s - \left(\frac{k_p}{L_m} - j\omega_s \frac{M}{L_m L_s}\right) \vec{u}_s + k_i \int \left(\vec{i}_{r,ref} - \frac{\psi_s}{L_m} + \frac{L_s}{L_m} \vec{i}_s\right) dt \quad (13)$$

式(13)即为转子侧变流器的输出电压, 反映了转子侧变流器控制系统控制参数与定子电流的关系, 将式(13)的转子电压代入式(5), 可得到电网发生短路故障后的定子电流的动态方程为

$$D^2 \vec{i}_s + \alpha_1 D \vec{i}_s + \alpha_2 \vec{i}_s = \beta_1 \vec{i}_{r,ref} + \beta_2 k u_s + \beta_3 (1-k) \vec{u}_s e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s} \quad (14)$$

式中: $\alpha_1 = \frac{L_s(R_r + k_p)}{M}$, $\alpha_2 = \frac{L_s k_i}{M}$; $\beta_1 = -\frac{L_m k_i}{M}$,

$$\beta_2 = \frac{k_i}{j\omega_1 M}, \quad \beta_3 = -\frac{(k_p - k_i/j\omega_1 + R_r - j\omega_1 L_r + j\omega_s L_m^2/L_s)}{M}$$

求解该微分方程, 可得电网短路后在同步旋转坐标系下的定子电流为

$$\vec{i}_s = A_2 + (B_2 + C_2) e^{-j\omega_1 t} e^{-t/T_s} + D_2 e^{-j\omega_1 t} e^{-k_1 t} + E_2 e^{-j\omega_1 t} e^{-k_2 t} \quad (15)$$

式中: $k_1 = \frac{1}{2}(\alpha_1 - \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_2})$; $k_2 = \frac{1}{2}(\alpha_1 + \sqrt{\alpha_1^2 - 4\alpha_2})$ 。

由式(15)可知, 当电网发生对称故障引起机端电压出现非严重对称跌落时, 考虑转子侧变流器控制系统对定子电流的影响, 定子电流包含直流分量、交流衰减分量和谐波分量(在同步旋转坐标系下), A_2 、 B_2 、 C_2 、 D_2 、 E_2 分别为其对应分量的幅值, 其数值如附录 A 所示。各频率成分的幅值及其影响因素如表 1 所示, 其中 \vec{u}_s 代表故障前机端电压

表 1 短路电流频率分量及其影响因素

Table 1 Frequency component and its influencing factors

频率分量 \ 影响因素	\vec{u}_s	$k\vec{u}_s$	$\vec{i}_{r,ref}$	k_p, k_i	是否衰减
直流分量	A	×	√	×	不衰减
交流衰减分量	B ₂	√	×	×	以 T _s 衰减
	C ₂	√	×	√	以 T _s 衰减
谐波分量	D ₂	×	×	√	以 k ₁ 衰减
	E ₂	×	×	√	以 k ₂ 衰减

矢量, $\overline{ku_s}$ 代表故障后机端电压矢量, $\vec{i}_{r,ref}$ 代表转子电流参考矢量值, k_p 、 k_i 代表PI控制器的比例常数和积分常数, “√”代表与该因素有关, “×”代表与该因素无关。

结合式(15)和表 1 可知, 与撬棒电路投入的情况比较发现, 考虑控制系统影响的短路电流中产生了与转子侧控制系统控制参数相关的电流分量。当机端电压非严重跌落时, 定子电流包含直流分量、交流衰减分量和谐波分量, 谐波分量的幅值受到转子侧控制系统PI参数的影响, 不再以常规转子衰减时间常数 T_r 衰减, $T_r = M/L_s R_r$, 而是以衰减时间常数 k_1 、 k_2 快速衰减至零, 交流衰减分量也包含了与控制系统控制参数相关的分量 C_2 , 以 T_s 缓慢衰减为零。

3 仿真验证

以 Matlab/Simulink 提供的 1.5 MW 双馈风电机组仿真模型为参考, 通过仿真波形与解析计算波形对比, 验证本文给出的机端电压严重和非严重跌落两种情况下定子短路电流计算表达式的有效性。

故障前, 双馈风电机组超同步运行, 其中撬棒电阻阻值取 30 倍的转子绕组的阻值, 控制策略采用恒功率控制, 输出功率为 $P=0.9$ p.u., $Q=0$ 。仿真和解析计算所用双馈风电机组基本参数及撬棒电阻设定值如附录 B 所示。

3.1 机端电压严重跌落仿真

假设 $t=0$ ms 时, 机端发生三相短路, 机端电压跌落为零, 撬棒保护立即投入运行。定子 ABC 三相的短路电流解析计算波形与仿真波形对比图, 如图 3 所示。

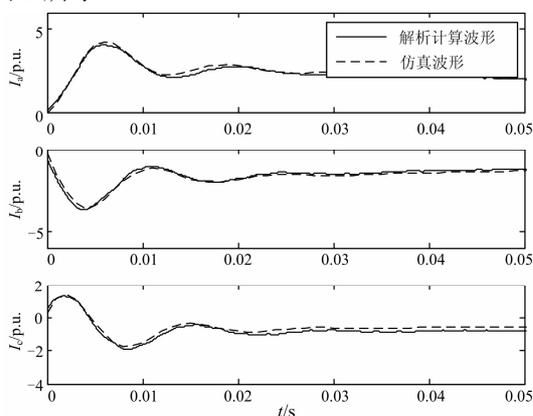


图 3 对称短路时, 考虑撬棒电路投入定子短路电流解析计算波形与仿真波形对比图

Fig. 3 Simulated and calculated DFIG short-circuit current considering the insertion of crowbar for a three-phase fault

由图 3 可以看出, 当电网发生三相对称性短路, 机端电压跌落为零, 撬棒保护立即动作后, 转速频率分量在两个周波左右衰减结束, 只剩下衰减的直流分量(在三相静止坐标系中)。本文给出的定子电流的解析计算波形可以复现定子三相短路电流的仿真波形, 验证了所得解析表达式的有效性。由于理论分析中假设转子转速不变, 而在故障发生后, 随着短路时间的增加, 转子的转速略微有些变化, 所以后期存在较小的误差是允许的。

3.2 机端电压非严重跌落仿真

假设 $t=0.5$ s 时, 机端发生三相短路, 机端电压跌落了 30%, 由于电网短路持续时间较短, 电网故障期间转速的变化忽略不计。在考虑转子侧控制系统影响下定子 ABC 三相的短路电流解析计算波形与仿真波形对比图, 如图 4 所示。

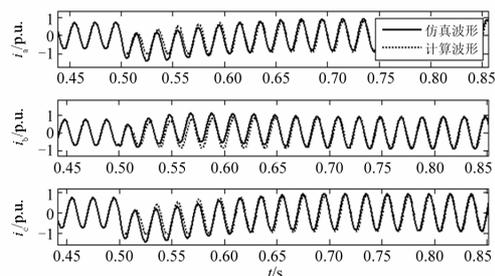


图 4 对称短路时, 考虑控制系统影响定子短路电流解析计算波形与仿真波形对比图

Fig. 4 Simulated and calculated DFIG short-circuit current considering the influence of control system for a three-phase fault

由图 4 所示的三相对称短路电流对比可以看出, 定子电流的大小和变化趋势的计算波形与仿真波形基本一致。电网短路瞬间, 在定子磁链和转子电压的作用下, 定子电流突然增大, 并呈现衰减振荡, 谐波分量很快衰减结束, 而暂态直流分量(在三相静止坐标系下)衰减时间较长。由于机端电压跌落程度并不严重, 定子电流的最大值约为 1.5 标么, 出现在第 2 个尖峰, 若采取控制策略可避免对发电机造成危害。与仿真结果对比可知, 计算结果和仿真结果的大小和变化趋势基本符合, 验证了所得解析表达式的有效性。

4 结语

本文对双馈风电机组在低电压穿越过程中的故障暂态特性进行了系统分析。针对双馈风电机组会根据机端电压跌落程度采取不同保护策略的情况, 提出了分别考虑撬棒投入和考虑控制系统影响时双馈感应发电机故障暂态特性的统一解析方法。以对

称故障为例, 分析并推导了当电网电压出现严重和非严重对称跌落时双馈风电机组定子电流的解析表达式。通过对其计算表达式的分析可知, 其定子电流中均包含三种电流分量, 计算表达式具有清晰的物理意义, 对于双馈风电机组低压穿越能力的研究和控制策略的进一步改进, 以及含双馈风电机组的电力系统的短路电流计算和继电保护整定具有十分重要的意义。

附录 A

$$A_1 = \frac{j\omega L_r + R_t}{j\omega_1 M (j\omega + 1/T_{r1})} k \bar{u}_s$$

$$B_1 = \frac{j\omega_r L_r + R_t}{j\omega_1 M (-j\omega_r + 1/T_{r1} + 1/T_s)} (1-k) \bar{u}_s$$

$$C_1 = \bar{i}_s(0) - \frac{j\omega L_r + R_t}{j\omega_1 M (j\omega + 1/T_{r1})} k \bar{u}_s(0) - \frac{j\omega_r L_r + R_t}{j\omega_1 M (-j\omega_r + 1/T_{r1} + 1/T_s)} \cdot (1-k) \bar{u}_s(0)$$

$$A_2 = -\frac{L_m}{L_s} \vec{i}_{r,ref} + \frac{k \vec{u}_s}{j\omega_1 L_s}$$

$$B_2 = \frac{(1-k) \vec{u}_s}{j\omega_1 L_s}$$

$$C_2 = \frac{\beta_3}{(j\omega_1 + 1/T_s)^2 - \alpha_1 (j\omega_1 + 1/T_s) + \alpha_2} (1-k) \vec{u}_s$$

$$D_2 = \frac{L_m}{L_s} \frac{k_2 \vec{i}_{r,ref}}{k_1 - k_2}$$

$$E_2 = \frac{L_m}{L_s} \frac{k_1 \vec{i}_{r,ref}}{k_1 - k_2}$$

附录 B

表 1 双馈风电机组的参数
Table 1 Parameters of DFIG

额定电压 U	575 V
额定功率 S	1.5 MW
系统频率 f	60 Hz
定子侧电阻 R_s	0.007 3 p.u.
转子侧电阻 R_r	0.005 2 p.u.
撬棒电阻 R_c	30 R_r
定转子互感 L_m	3 p.u.
定子自感 L_s	3.176 6 p.u.
转子自感 L_r	3.161 0 p.u.
转子转速 ω_r	1.15 p.u.
比例系数 k_p	0.1 p.u.
积分系数 k_i	0.2 p.u.

参考文献

- [1] 刘其辉, 谢孟丽. 双馈式变速恒频风力发电机的空载及负载并网策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 60-67, 78.
LIU Qihui, XIE Mengli. Strategies of grid-connection of doubly-fed variable-speed constant-frequency wind power generator with no-load and with load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 60-67, 78.
- [2] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电网技术, 2012, 36(7): 195-201.
JIAO Zaiqiang. A survey on relay protection for grid-connection of large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 195-201.
- [3] 贺益康, 胡家兵, 徐烈. 并网双馈异步风力发电机运行控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [4] RAHIMI M, PARNIANI M. Grid-fault ride-through analysis and control of wind turbines with doubly fed induction generators[J]. Electric Power Systems Research, 2010(8): 184-195.
- [5] 孔祥平, 张哲, 尹向根, 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.
- [6] MORREN J, SJOERD W H, de HAAN. Short circuit current of wind turbines with doublyfed induction generator[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(1): 174-180.
- [7] 郭家虎, 张鲁华, 蔡旭. 双馈风力发电系统在电网三相短路故障下的响应与保护[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(6): 40-48.
GUO Jiahu, ZHANG Luhua, CAI Xu. Response and protection of DFIG system under three-phase short circuit fault of grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(6): 40-48.
- [8] 撒奥洋, 张哲, 尹项根, 等. 双馈风力发电系统故障特性及保护方案构建[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 233-239.
HAN Aoyang, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on fault characteristic and grid connecting-point protection scheme for wind power generation with doubly-fed induction generator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 233-239.

- [9] 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.
- [10] 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, 30(22): 29-36.
XU Dianguo, WANG Wei, CHEN Ning. Dynamic characteristic analysis of doubly-fed induction generator low voltage ride-through based on crowbar protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 29-36.
- [11] 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.
- [12] 王定国, 张红超. 双馈型风力发电机低电压穿越的分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(17): 70-73.
WANG Dingguo, ZHANG Hongchao. Analysis and research of low voltage ride through for doubly fed wind power generator[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(17): 70-73.
- [13] 贺益康, 胡家兵. 双馈风力发电系统的低压穿越运行与控制[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(2): 49-52.
HE Yikang, HU Jiabing. Low voltage ride through operation and control of doubly fed induction generator wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(2): 49-52.
- [14] 杨之俊, 吴红斌, 丁明, 等. 故障时双馈风力发电系统的控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 14-18.
YANG Zhijun, WU Hongbin, DING Ming, et al. Control strategy of doubly-fed wind generation system for power grid fault[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 14-18.
- [15] 王勇, 张纯江, 柴秀慧, 等. 电网电压跌落情况下双馈风力发电机电磁过渡过程及控制策略[J]. 电工技术学报, 2011, 26(12): 14-19.
WANG Yong, ZHANG Chunjiang, CHAI Xiuhui, et al. Electromagnetic transient process and control strategy for doubly-fed wind power generator under grid voltage dip[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(12): 14-19.

收稿日期: 2014-01-09; 修回日期: 2014-05-06

作者简介:

郑涛(1975-), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail: zhengtao_sf@126.com

李娟(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源电力系统保护与控制; E-mail: j_er2012@126.com

杨国生(1977-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护。