

# Research on Characteristics of Short-Circuit Current of DFIG Based Wind Farm

Rui Wu, Xiaofu Xiong, Jinxin Ouyang

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing

Email: 532901639@qq.com

Received: Mar. 23<sup>rd</sup>, 2016; accepted: Apr. 8<sup>th</sup>, 2016; published: Apr. 11<sup>th</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Wind farms consisting mainly of doubly-fed induction generators occupy more and more proportion in power supply. There do exist big differences of output short-circuit current characteristic between the doubly-fed induction generator and the synchronous generator. Research about the fault transient analysis of doubly-fed induction generators has become a hotspot; however, current research mainly focuses on the grid-connected system with single generator. This paper analyzes the short-circuit transient process of single doubly-fed induction generator in complex frequency domain and establishes the equivalent circuits of fundamental frequency, DC and rotor-speed frequency components in transient process respectively to study the changing regularity of short-circuit current of doubly-fed wind farms. Then this paper deduces the expression of short-circuit current increment of single generator in wind farm, and based on this, this paper further uses the improved weighted method to deduce the calculation formula of doubly-fed wind farm. Accuracy of the changing regularity of short-circuit current and the calculation formula is verified through simulation.

## Keywords

DFIG Based Wind Farm, Short-Circuit Current, Complex Frequency Domain, Equivalent Circuit, Compensated Increment

---

# 双馈型风电场并网短路电流特性研究

乌 睿, 熊小伏, 欧阳金鑫

文章引用: 乌睿, 熊小伏, 欧阳金鑫. 双馈型风电场并网短路电流特性研究[J]. 智能电网, 2016, 6(2): 73-86.

<http://dx.doi.org/10.12677/sg.2016.62009>

重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆  
Email: 532901639@qq.com

收稿日期: 2016年3月23日; 录用日期: 2016年4月8日; 发布日期: 2016年4月11日

## 摘要

以双馈型风力发电机为主的风电场在电力供应中占有越来越大的比重。双馈感应发电机输出的短路电流特性与同步发电机具有较大区别, 目前双馈风电的故障暂态分析已成为风电并网的研究热点, 但主要集中于单个机组并网系统方面。本文首先基于复频域分析了单台双馈风电机组的短路暂态过程, 建立双馈型风电场暂态期间的工频、直流和转速频率分量的等效电路, 对双馈型风电场的短路电流变化规律进行研究。推导出风电场中单台风电机组的短路电流增量表达式, 基于短路电流的增量利用补偿增量的方法推导出双馈风电场的短路电流计算式。仿真验证了风电场内部的短路电流变化规律和解析表达式的准确性。

## 关键词

双馈型风电场, 短路电流, 复频域, 等效电路, 补偿增量

## 1. 引言

随着风力发电技术的飞速发展, 以双馈型风力发电机为主的风电场在电力供应中占有越来越大的比重。双馈型风电场接入电网的方式分为分散式并网和集中式并网[1]。分散式双馈风电场发电机组的容量较小, 均属于小型发电机组, 以就地消纳为主[2]。集中式双馈风电场是在风能资源比较丰富的地区集中发电, 并通过专用的联络线并入高压电网。集中式的风力发电比较符合我国的国情。但大规模集中式风电场并网势必对电网的保护配置、系统的安全运行产生一定的影响, 因此针对双馈风电场的短路电流特征研究是一个亟需解决的关键问题[3]-[5]。

目前, 研究人员通过比较双馈风电机组与相同容量同步发电机组的短路电流波形, 验证了双馈风电机组接入对电力系统暂态运行特性的影响, 提出了双馈风电机组并网系统暂态分析的重要性[6]。对单台DFIG的短路电流进行了大量研究[7]-[9], 其暂态特性短路电流特性较为明确。

在双馈式风电场的暂态仿真方面, 少量研究人员开展了相关研究。文献[10]分析了双馈式风电场的故障特性及影响因素, 但是仅利用单台双馈风电机组来代表风电场。文献[11]针对短路容量比、联络线阻抗比等因素对双馈风电场暂态特性的影响进行了仿真分析, 但该研究人员采用了多机并联的风电场模型。为了获取准确的风电场暂态特性, 部分研究人员采用详细模型对双馈式风电场的故障暂态特性进行了分析[12] [13]。从研究结果来看, 详细模型能较好地反映了风电场的暂态运行特性, 但受运算速度和时间的制约, 所采用的详细模型机组数量均较少。

可以看出, 双馈风电场的暂态特征分析主要通过将风电场等值为一台或者多台风电机组的方式来研究, 已有的研究主要以时域仿真为手段, 无法解释双馈型风电场的故障演化机理、故障计算等值等问题, 双馈风电场并网的短路电流特征也不明确[14] [15]。

鉴于此, 本文基于双馈风电机组单机并网系统的短路电流特性基础上, 更进一步研究双馈型风电场并网的短路电流特性。通过研究风电场内部的短路电流变异机理, 推导出风电场中单台风电机组的短路电流增量表达式, 基于短路电流的增量利用补偿增量的方法推导出双馈风电场的短路电流计算式。仿真验证了风电场内部的短路电流变化规律和解析表达式的准确性。

## 2. 双馈风电机组暂态过程分析

同步旋转坐标系下, 计及撬棒保护的双馈感应发电机电压和磁链的空间矢量方程为:

$$\mathbf{u}_s = R_s \mathbf{i}_s + D\boldsymbol{\psi}_s + j\omega_1 \boldsymbol{\psi}_s \quad (1)$$

$$0 = R_r' \mathbf{i}_r + D\boldsymbol{\psi}_r + j\omega_{slip} \boldsymbol{\psi}_r \quad (2)$$

$$\boldsymbol{\psi}_s = L_s \mathbf{i}_s + L_m \mathbf{i}_r \quad (3)$$

$$\boldsymbol{\psi}_r = L_m \mathbf{i}_s + L_r \mathbf{i}_r \quad (4)$$

式中,  $\mathbf{u}$  表示电压空间矢量,  $\mathbf{i}$  表示电流空间矢量,  $\boldsymbol{\psi}$  表示磁链空间矢量;  $R$  表示电阻,  $L$  表示电感; 下标  $s$ 、 $r$  和  $m$  分别表示定子侧的物理量、转子侧的物理量和激磁分量;  $\omega_1$ 、 $\omega_{slip}$  分别表示同步角速度和转差角速度,  $\omega_{slip} = \omega_1 - \omega_r$ ,  $\omega_r$  为转子角速度;  $D$  表示时域微分算子;  $R_r' = R_r + R_{crowbar}$  为转子侧保护投入后转子侧的等值电阻,  $R_{crowbar}$  为撬棒保护电阻。

在  $t_0$  时刻电网发生三相对称故障后认为阶跃变化为  $\mathbf{u}_f$ 。由于电网容量相对较大, 认为故障后的机端电压中仅含工频分量, 即:

$$\mathbf{u}_s = \begin{cases} \mathbf{u}_{so} = \mathbf{u}_{so}^f = U_{so} e^{j\phi} & t < t_0 \\ \mathbf{u}_f = \mathbf{u}_f^f = U_f e^{j\phi} & t \geq t_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $\mathbf{u}_{so}$ 、 $\mathbf{u}_f$  分别表示短路故障前后的机端电压空间矢量;  $\mathbf{u}_{so}^f$ 、 $\mathbf{u}_f^f$  分别表示短路故障前后工频下的机端电压空间矢量;  $U_{so}$ 、 $U_f$  分别表示故障前后机端电压工频量幅值;  $\phi$  表示机端A相电压工频量的初始相角。

由式(1)和(3)可得定子磁链与定子电压及转子电流的关系为:

$$\mathbf{u}_s + \frac{L_m R_s}{L_s} \mathbf{i}_r + \frac{R_s}{L_s} \boldsymbol{\psi}_s + D\boldsymbol{\psi}_s + j\omega_1 \boldsymbol{\psi}_s = 0 \quad (6)$$

考虑到定子磁链值在短路故障前后必然连续, 则有  $\boldsymbol{\psi}_s(t_0^+) = \boldsymbol{\psi}_s(t_0^-)$ 。假设短路故障发生在  $t_0 = 0$  时刻, 令磁链的初始值  $\boldsymbol{\psi}_s(t_0^-) = \boldsymbol{\psi}_s(0)$ 。将式(5)转化到复频域,  $s$  表示复频域算子, 得到:

$$\boldsymbol{\psi}_s(s) = G_1 \left( \mathbf{u}_s(s) + \boldsymbol{\psi}_s(0) + \frac{L_m R_s}{L_s} \mathbf{i}_r(s) \right); G_1 = \frac{1}{s + R_s/L_s + j\omega_1} \quad (7)$$

将式(3)转化到复频域并变形:

$$\mathbf{i}_s(s) = (\boldsymbol{\psi}_s(s) - L_m \mathbf{i}_r(s)) / L_s \quad (8)$$

在实际系统中  $R_s \ll \omega_1 L_s$ , 因此联立式(6)和式(7)可得到, 定子电流与转子电流存在如下关系:

$$\mathbf{i}_s(s) = -\frac{L_m}{L_s} \mathbf{i}_r(s) + \frac{1}{L_s} G_1 (\mathbf{u}_s(s) + \boldsymbol{\psi}_s(0)) \quad (9)$$

拉氏逆变换后得:

$$\mathbf{i}_s = -\frac{L_m}{L_s} \mathbf{i}_r + \frac{\boldsymbol{\psi}_s(0)}{L_s} e^{-(R_s/L_s + j\omega_1)t} + \frac{\mathbf{u}_f}{R_s + j\omega_1 L_s} (1 - e^{-(R_s/L_s + j\omega_1)t}) \quad (10)$$

由式(2)和(4)可得转子磁链与转子电压及转子电流的关系为:

$$R_r' \mathbf{i}_r + \sigma L_r D \mathbf{i}_r + j\omega_{slip} \sigma L_r \mathbf{i}_r + \frac{L_m}{L_s} D \boldsymbol{\psi}_s + \frac{L_m}{L_s} j\omega_{slip} \boldsymbol{\psi}_s = 0 \quad (11)$$

将式(11)转换到复频域中, 转子电流可用定子磁通和转子磁通初始值表示:

$$\mathbf{i}_r(s) = G_R(G_s \boldsymbol{\Psi}_s(s) + \boldsymbol{\Psi}_r(0)); G_R = \frac{1}{R'_r + s\sigma L_r + j\omega_{slip}\sigma L_r}; G_s = -\frac{L_m}{L_s}(s + j\omega_{slip}) \quad (12)$$

将式(7)代入式(12)中变形后可得转子电流可表示为:

$$\mathbf{i}_r^c(s) = G_{rr} \boldsymbol{\Psi}_r(0) + G_{rs}(\mathbf{u}_s(s) + \boldsymbol{\Psi}_s(0)) \quad (13)$$

式中,  $G_{rr}$  和  $G_{rs}$  的具体参数见附录①。利用拉式逆变换, 可得电网故障下计及撬棒保护的转子电流的时域表达式为:

$$\mathbf{i}_r = \mathbf{i}_r^f + \mathbf{i}_r^{dc1} + \mathbf{i}_r^{dc2} + \mathbf{i}_r^{ro} \quad (14)$$

式中, 各频率分量的系数见附录②。上标  $f$  表示工频周期的电气量;  $dc1$  表示以  $\tau'_s = \sigma L_s/R'_s$  为衰减常数的直流电气量;  $dc2$  表示以  $\tau_s = L_s/R_s$  为衰减常数的直流电气量;  $ro$  表示以  $\tau'_r = \sigma L_r/R'_r$  为衰减常数的转速频率电气量。

将(14)代入(10)可得计及撬棒保护的定子电流时域表达式如下, 各频率分量的系数见附录②。

$$\mathbf{i}_s = \mathbf{i}_s^f + \mathbf{i}_s^{dc1} + \mathbf{i}_s^{dc2} + \mathbf{i}_s^{ro} \quad (15)$$

由式(14)、(15)可得各定子、转子磁链分量如下, 各频率分量的系数见附录③。

$$\begin{cases} \boldsymbol{\Psi}_s = \boldsymbol{\Psi}_s^f + \boldsymbol{\Psi}_s^{dc1} + \boldsymbol{\Psi}_s^{dc2} + \boldsymbol{\Psi}_s^{ro} \\ \boldsymbol{\Psi}_r = \boldsymbol{\Psi}_r^f + \boldsymbol{\Psi}_r^{dc1} + \boldsymbol{\Psi}_r^{dc2} + \boldsymbol{\Psi}_r^{ro} \end{cases} \quad (16)$$

### 3. 风电场各频率分量的空间矢量等效电路建立

已知各频率的磁链分量、电流分量相互独立且满足双馈风电机定子、转子电压方程式(1)和式(2)。可得到同步旋转坐标系下不同频率的空间矢量形式等效电路图。如图 1 所示。

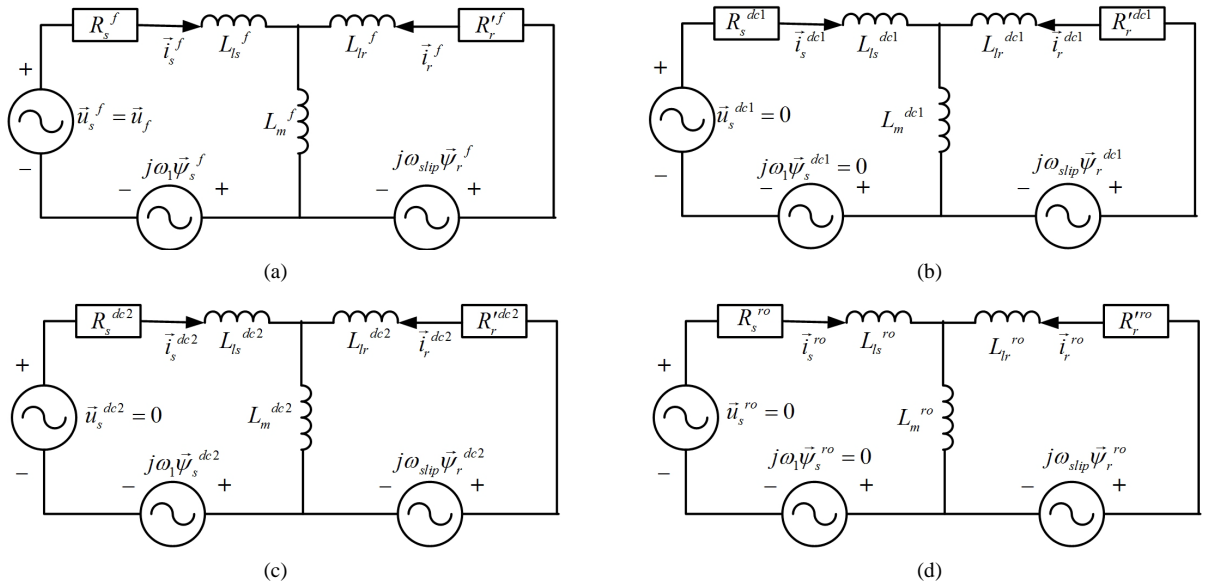


Figure 1. Vector equivalent circuit of DFIG under grid fault. (a) Power frequency periodic component; (b) dc 1 component; (c) dc 2 component; (d) rotor-frequency component

图 1. 电网故障下各频率分量的空间矢量等效电路图。(a) 工频周期分量; (b) 直流 1 分量; (c) 直流 2 分量; (d) 转速频率分量

在同步旋转坐标系下, 对于工频、具有相同衰减常数的直流和转速频率电气矢量仍满足基尔霍夫定律。电阻元件的电压矢量与电流矢量为线性关系, 因此在同步旋转坐标系中各频率下的电阻  $R$  相同:

$$\begin{cases} \mathbf{u}^f = R\mathbf{i}^f \\ \mathbf{u}^{dc1} = R\mathbf{i}^{dc1} \\ \mathbf{u}^{dc2} = R\mathbf{i}^{dc2} \\ \mathbf{u}^{ro} = R\mathbf{i}^{ro} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} R^f = R \\ R^{dc1} = R \\ R^{dc2} = R \\ R^{ro} = R \end{cases} \quad (17)$$

电感元件的电压矢量与电流矢量存在微分运算过程, 在同步旋转坐标系中矢量的位置随时间变化。使得不同衰减常数和频率下的电感值有所不同:

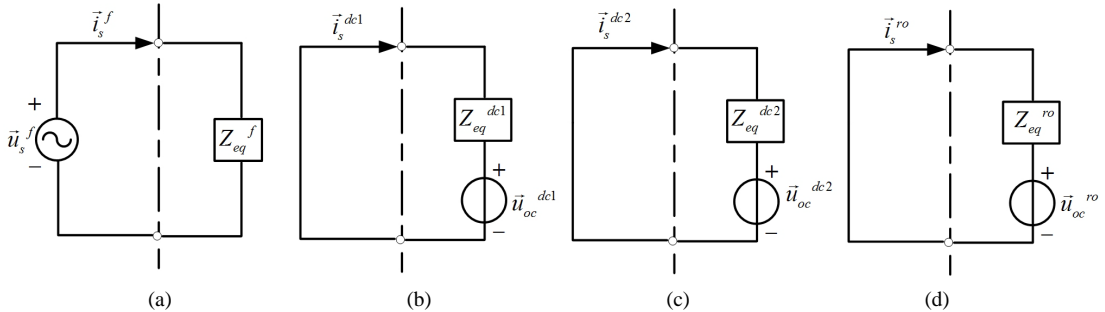
$$\begin{cases} \mathbf{u}^f = L\mathbf{D}\mathbf{i}^f = 0 \\ \mathbf{u}^{dc1} = L\mathbf{D}\mathbf{i}^{dc1} = -(R_s/\sigma L_s + j\omega_1)L\mathbf{i}^{dc1} \\ \mathbf{u}^{dc2} = L\mathbf{D}\mathbf{i}^{dc2} = -(R_s/L_s + j\omega_1)L\mathbf{i}^{dc2} \\ \mathbf{u}^{ro} = L\mathbf{D}\mathbf{i}^{ro} = -(R'_r/\sigma L_r + j\omega_{slip})L\mathbf{i}^{ro} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} L^f = 0 \\ L^{dc1} = -(R_s/\sigma L_s + j\omega_1)L \\ L^{dc2} = -(R_s/L_s + j\omega_1)L \\ L^{ro} = -(R'_r/\sigma L_r + j\omega_{slip})L \end{cases} \quad (18)$$

在微分运算下  $L^f$ 、 $L^{dc1}$ 、 $L^{dc2}$  和  $L^{ro}$  如式(18)所示, 与电阻元件一样满足线性关系。因此在同步旋转坐标系下电感可以等效为电阻元件来处理, 与电阻元件具有相同的量纲。利用式(17)和(18)转换等效电路图 1 中对应的定子、转子电阻和电感值, 见附录④。

电网发生短路故障后, 定子、转子工频磁链  $\boldsymbol{\psi}_s^f$  和  $\boldsymbol{\psi}_r^f$  由故障后定子工频电压  $\mathbf{u}_f$  决定, 因此在矢量形式工频等效电路中,  $j\omega\boldsymbol{\psi}_s^f$  和  $j\omega_{slip}\boldsymbol{\psi}_r^f$  相当于受控电压源, 其电压大小受到定子电压的控制; 定子、转子直流磁链和转速频率磁链与故障前定子电压幅值  $U_{so}$ 、转子磁链初始值  $\boldsymbol{\psi}_r(0)$  以及故障后定子工频电压  $\mathbf{u}_f$  有关, 定子电压的直流分量和转速频率分量很小可以忽略, 因此由定子、转子直流磁链和转速频率磁链产生的电压压降不受定子电压的控制, 相当于独立电压源。

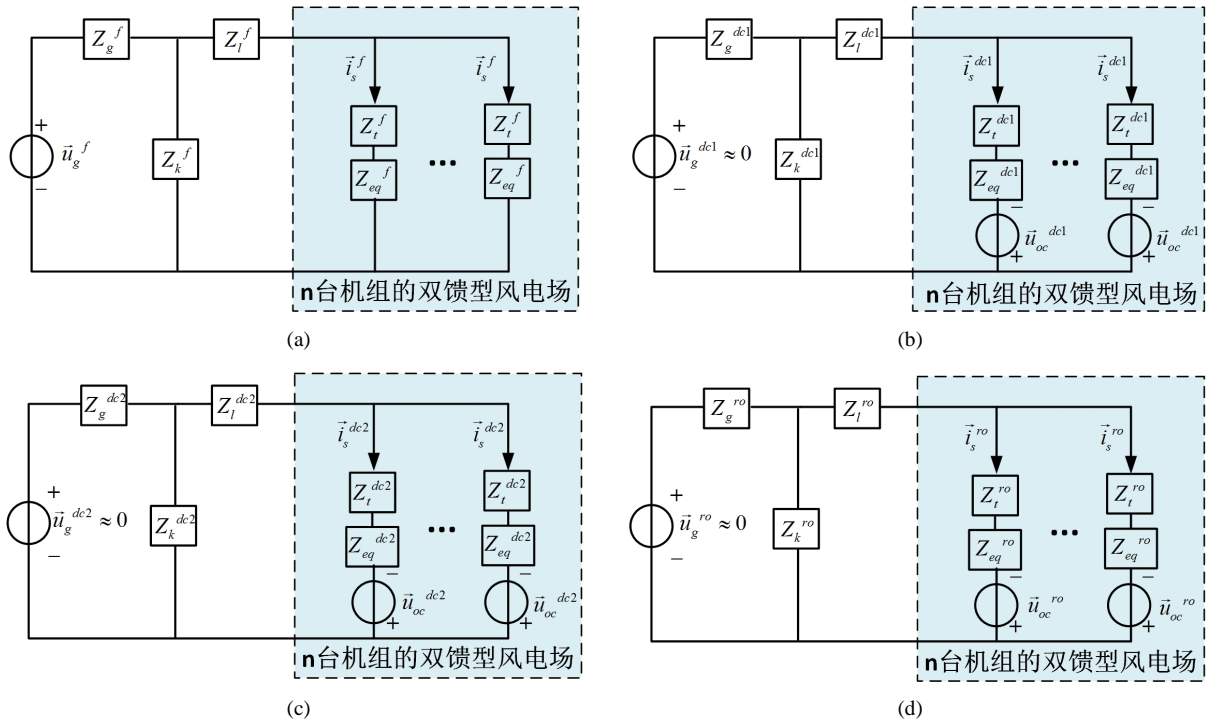
矢量形式各频率电路均为含源一端口电路, 电阻和电感具有相同的量纲, 因此各频率电压矢量与电流矢量呈现线性函数关系, 可以等效变换为带内阻的电压源, 即戴维宁等效电路。将图 1 简化为戴维宁等效电路, 如图 2 所示。双馈风电机组工频、直流、转速频率电路的开路电压和等效阻抗, 见附录⑤。

对于集中式双馈风电场而言[16], 每台风电机组并联运行, 因此在电网故障下, 每台双馈风电机组的短路电流具有相同的变化规律。由图 2 可得,  $n$  台风电机组并联的风电场, 电网故障后各频率的等效电路如图 3 所示。  $Z_g$  表示电网系统的等效阻抗;  $Z_k$  表示短路点的接地阻抗,  $Z_l$  表示短路点到风电机组并网点等效阻抗;  $Z_t$  表示单台风电机组箱变阻抗; 忽略风电机组之间的线路阻抗。



**Figure 2.** The Thevenin's equivalent circuit diagram of DFIG under grid fault at different frequencies. (a) Power frequency periodic component; (b) dc 1 component; (c) dc 2 component; (d) rotor-frequency component

**图 2.** 电网故障下 DFIG 各频率分量的戴维宁等效电路图。(a) 工频周期分量; (b) 直流 1 分量; (c) 直流 2 分量; (d) 转速频率分量



**Figure 3.** The equivalent circuit of DFIG based wind farm under grid fault at different frequencies. (a) Power frequency periodic component; (b) dc 1 component; (c) dc 2 component; (d) Rotor-frequency component

**图 3.** 电网故障下双馈型风电场的各频率分量等效电路图。(a) 工频周期分量；(b) 直流 1 分量；(c) 直流 2 分量；(d) 转速频率分量

#### 4. 风电场短路电流变化规律

假设风电场中各双馈风电机组的稳态运行工况及参数一致。 $i_s^f(n)$ 、 $i_s^{dc1}(n)$ 、 $i_s^{dc2}(n)$ 和 $i_s^{ro}(n)$ 分别为双馈风电场(并网数目为  $n$  台)中单台双馈风电机组的输出短路电流工频、直流和转速频率分量。通过求解电路可得到同步旋转坐标系下，电流各频率的分量的表达式为：

$$i_s^f(n) = \frac{k^f u_g^f}{nk^f Z_g^f + nZ_l^f + Z_t^f + Z_{eq}^f} \quad (n \geq 1); \quad k^f = \frac{Z_k^f}{Z_g^f + Z_k^f} \quad (19)$$

$$i_s^{dc1}(n) = \frac{u_{oc}^{dc1}}{nk^{dc1} Z_g^{dc1} + nZ_l^{dc1} + Z_t^{dc1} + Z_{eq}^{dc1}} \quad (n \geq 1); \quad k^{dc1} = \frac{Z_k^{dc1}}{Z_g^{dc1} + Z_k^{dc1}} \quad (20)$$

$$i_s^{dc2}(n) = \frac{u_{oc}^{dc2}}{nk^{dc2} Z_g^{dc2} + nZ_l^{dc2} + Z_t^{dc2} + Z_{eq}^{dc2}} \quad (n \geq 1); \quad k^{dc2} = \frac{Z_k^{dc2}}{Z_g^{dc2} + Z_k^{dc2}} \quad (21)$$

$$i_s^{ro}(n) = \frac{u_{oc}^{ro}}{nk^{ro} Z_g^{ro} + nZ_l^{ro} + Z_t^{ro} + Z_{eq}^{ro}} \quad (n \geq 1); \quad k^{ro} = \frac{Z_k^{ro}}{Z_g^{ro} + Z_k^{ro}} \quad (22)$$

从推导的表达式可以得出，双馈型风电场中单台风电机组输出的短路电流与单个风电机组并网系统输出的短路电流有一定的区别。双馈型风电场下的单台风电机组输出短路电流大小不仅与系统的运行方式、短路阻抗、风电场参数有关，还有风电场并网的风电机组数目有关。由于风速波动性和随机性，使得风电场接入电力系统的台数也会频繁发生变化，因此双馈型风电场在并网机组数目变化的情况下，研究单台风电机组输出短路电流的变化规律就很有必要性。



假设风电场并网数目为台  $n$  ( $n > 1$ ) 时, 风电场中单台风电机组的输出短路电流  $i_s(n)$  比并网数目为 1 时的短路电流  $i_s(1)$  大, 根据表达式(19)至(22), 可得  $i_s(n) - i_s(1)$  对应的各频率电流的增量表达式为:

$$\Delta i_s^f = i_s^f(1) \frac{(k^f Z_g^f + Z_l^f)(1-n)}{(nk^f Z_g^f + nZ_l^f + Z_t^f + Z_{eq}^f)} \quad (n > 1) \quad (23)$$

$$\Delta i_s^{dc1} = i_s^{dc1}(1) \frac{(k^{dc1} Z_g^{dc1} + Z_l^{dc1})(1-n)}{(nk^{dc1} Z_g^{dc1} + nZ_l^{dc1} + Z_t^{dc1} + Z_{eq}^{dc1})} \quad (n > 1) \quad (24)$$

$$\Delta i_s^{dc2} = i_s^{dc2}(1) \frac{(k^{dc2} Z_g^{dc2} + Z_l^{dc2})(1-n)}{(nk^{dc2} Z_g^{dc2} + nZ_l^{dc2} + Z_t^{dc2} + Z_{eq}^{dc2})} \quad (n > 1) \quad (25)$$

$$\Delta i_s^{ro} = i_s^{ro}(1) \frac{(k^{ro} Z_g^{ro} + Z_l^{ro})(1-n)}{(nk^{ro} Z_g^{ro} + nZ_l^{ro} + Z_t^{ro} + Z_{eq}^{ro})} \quad (n > 1) \quad (26)$$

从各频率分量的增量表达式可得到双馈风电场内单台风电机组的短路电流变化规律:

1) 随着风电场并网机组数目的增加( $n > 1$  时), 单台风电机组的各频率短路电流增量  $\Delta i_s$  与对应频率的短路电流  $i_s(1)$  之比小于 0, 表明在系统及风电场参数不变, 电压跌落程度相同的情况下, 风电场中单台风电机组的短路电流绝对值随着并网机组数目的增加而减小; 若电压跌落程度越大时, 单台风电机组短路电流的增量的绝对值也越大, 受到并网数目的影响就越大。

2) 风电场中单台风电机组短路电流的增量与系统阻抗、风电场参数、风电机组参数有关。当电网系统等效阻抗和短路点到风电机组并网点的等效阻抗越大时, 受到并网数目的影响越大, 单台风电机组短路电流的增量越明显。风电机组箱变阻抗和双馈风电机组本身电阻、电抗越大时, 受到并网数目的影响越小, 单台风电机组短路电流的增量越弱。

双馈风电场中单台风电机组短路电流中直流、转速频率分量的增量实质是由风电场中各个双馈风电机组中直流及转速频率的定子、转子磁链产生的感应电动势相互影响而产生的。而工频分量的增量实质是由于风电场并联方式的分流规律而产生的。

## 5. 双馈型风电场的短路电流计算

目前双馈型风电场短路电流常采用加权法来计算和评估。通过对电网故障期间, 风电场中单台风电机组的输出短路电流的求解进而加权得到整个风电场的短路电流。

将表达式(17)变形并通过加权方法可获得双馈风电场的短路电流表达式, 如式(27)所示。

$$i_{sn} = ni_s^f + ni_s^{dc1} + ni_s^{dc2} + ni_s^{ro} \quad (27)$$

式(27)为采用传统的加权法求解得到的双馈风电场短路电流表达式, 由单个风电机组并网系统推导而来的。式中, 假设风电场并网机组台数为  $n$ , 且每台双馈风电机组的稳态运行工况及参数是相同的。

若对单台风电机组输出短路电流值应用补偿增量来求得风电场的短路电流, 如式(28)所示。

$$\begin{cases} i_{sgn} = ni_s^f + ni_s^{dc1} + ni_s^{dc2} + ni_s^{ro} + \Delta i_{sn} \\ \Delta i_{sn} = \Delta i_{sn}^f + \Delta i_{sn}^{dc1} + \Delta i_{sn}^{dc2} + \Delta i_{sn}^{ro} \end{cases} \quad (28)$$

式(28)为补偿增量法求解得到的双馈风电场短路电流表达式;  $\Delta i_s$  为双馈风电场中单台风电机组的输出短路电流增量;  $\Delta i_s^f$ 、 $\Delta i_s^{dc1}$ 、 $\Delta i_s^{dc2}$  和  $\Delta i_s^{ro}$  为工频、直流、转速频分量的增量分别通过式(23)~式(26)求解得来。

## 6. 仿真验证

系统仿真模型采用相同型号的 1.5 MW 双馈型风电机组，风电场结构如图 4 所示。风电场采用 15 行  $\times$  4 列整齐排列并以电缆相连接。风电机组的编号第一列从上至下为 WT01 至 WT15，以此类推第四列为 WT45 至 WT60。风电机组的机端电压为 575 V，经箱变升压至 10 kV 集电线，再经过 10 kv 集电网络接入到公共连接点，然后经过风电场主变压器升压至 110 kv 通过风电场联络线 20 km 接至电网。故障前采用恒功率控制方式，故障后撬棒保护瞬间动作且转子侧变流器闭锁。双馈风电场的具体参数见附录⑥，以双馈发电机组的额定功率和额定电压为基准值。

为不失一般性，在仿真过程中假设故障发生前每台风电机组的稳态运行点一致，且故障前后风速都相同。在  $t=2.0$  s 时刻， $f$  处电网发生三相永久性对称短路故障，风电场公共连接点电压跌落至 0.6 p.u。分析以下几种不同的情况：情况 A：双馈风电场内仅 WT01 号机组并网。情况 B：双馈风电场内 WT01~WT05 号机组并网。情况 C：双馈风电场内 WT01~WT20 号机组并网。情况 D：双馈风电场内 WT01~WT40 号机组并网。情况 E：双馈风电场内 WT01~WT60 号机组并网。情况 F：双馈风电场内 WT01 至 WT05 号，WT16 至 WT21 号，WT31 至 WT36 号，WT46 至 WT51 号机组并网。

### 6.1. 并网机组数目对短路电流增量的影响

已知情况 A~E 的故障情形一致，只是双馈风电场的并网数目不相同。观察 WT01 号机组输出的短路电流和风电场公共连接点电压，如图 5 所示。

由图 5 可知，在电网相同故障的条件下，随着双馈风电场中并网机组数目的增加，单台风电机组(WT01 号)的输出短路电流虽然在波形特征上一致，但是在数值上发生较大的变化。

在故障初始瞬间，由于短路电流是由工频分量、直流分量和转速频率分量叠加而来，ABC 三相电流中直流分量和转速频率分量的大小和方向各不相同，所以在故障初始瞬间单台风电机组的三相短路电流增量幅度大小也各不相同。但短路电流峰值的绝对值大小都随着并网机组数目的增加而减小，符合理论分析的结论。

在故障稳态期间，随着直流分量和转速频率分量逐渐衰减为零，单台风电机组短路电流的变化仅由工频分量的增量产生。由图 5(b)可知，此时单台风电机组的三相短路电流随并网机组台数的变化差异较于故障初始瞬间时刻要小，但其幅值随着并网机组数目的增加而减小，该特征仍与理论分析一致。

对比情况 C、F 可知，两者双馈风电场的并网数目相同，只是机组并网的位置不一样。此时观察 WT01 号机组输出的短路电流(B 相)，如图 6 所示。从图中发现，情况 C、F 的仿真曲线一致。相对于情况 A 而言，双馈风电场内单台风电机组短路电流增量大小一致。这说明在电网发生故障下，双馈风电场内部短路电流的变化与风电机组并网的位置无关。

### 6.2. 双馈风电场短路电流计算的验证

当双馈风电场仿真模型中 WT01~WT39 号机组并入电网，电网故障下得到双馈风电场出口处的输出短路电流(B 相)的仿真波形，如图 7 中的红线所示。将传统加权法推导得到的风电场短路电流表达式(27)和补偿增量法得到的表达式(28)，得到相应的 B 相短路电流计算波形，分别如图 7 中的蓝线和黑线所示。

图 7 中，通过补偿增量法计算得到的双馈风电场短路电流基本与仿真波形一致。传统加权法得到的故障初始瞬间的电流峰值为 108.4712 p.u，补偿增量法得到的电流峰值为 99.2057 p.u，而实际的仿真结果为 93.56 p.u，与仿真结果相比两者的误差分别为 15.94% 和 6.03%。

因此，采用补偿增量方法能更准确的评估风电场的故障电气量。传统加权法未考虑到双馈风电场内部短路电流的变化特征，采用其评估风电场短路电流必然带来较大的误差。由于风电场内部不同机组的



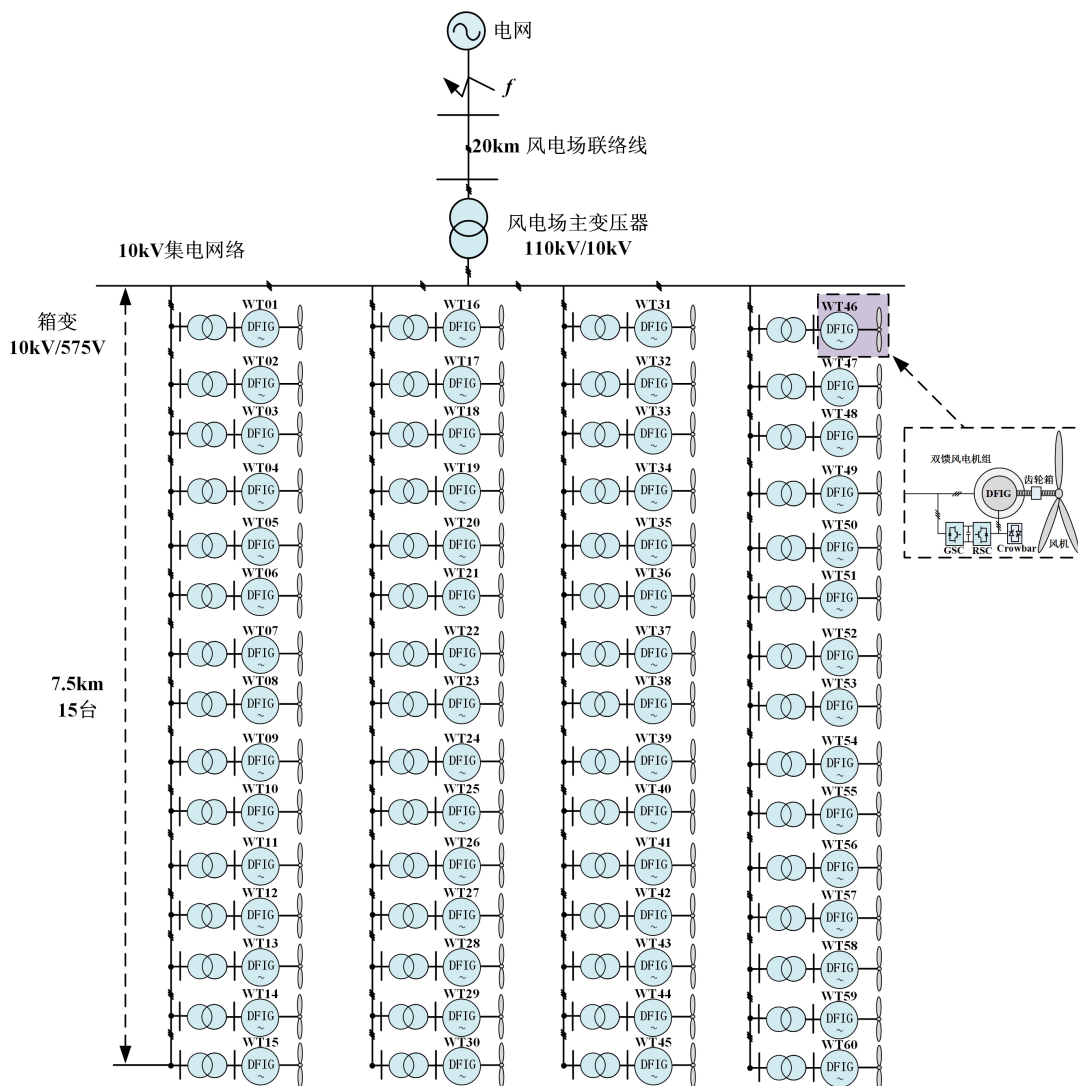


Figure 4. The simulation model of DFIG based wind farm  
图 4. 双馈型风电场的仿真模型

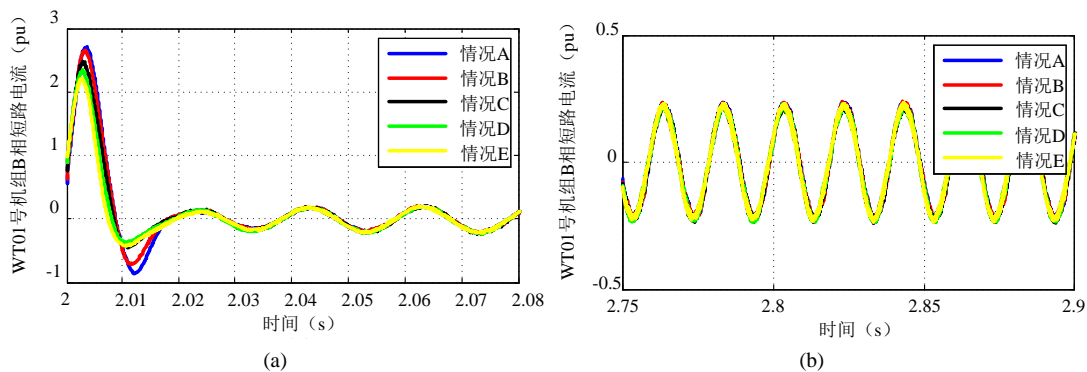


Figure 5. The short-circuit current of a set of DFIG under different numbers of DFIGs in the same fault condition (WT01). (a) Initial short-circuit current; (b) Steady-state short-circuit current  
图 5. 相同故障条件下, 不同并网机组数目时单台 DFIG 短路电流(WT01 号)。(a) 故障初始瞬间短路电流; (b) 故障稳态短路电流

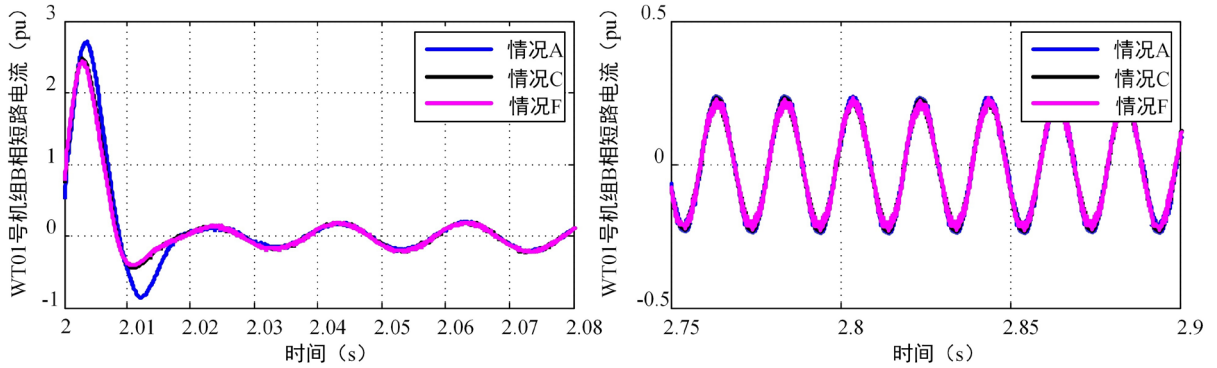


Figure 6. The short-circuit current of a set of DFIG with different connection when the number of DFIGs are the same (WT01)  
图 6. 相同并网机组数目下, 不同接线方式时单台 DFIG 短路电流(WT01 号)

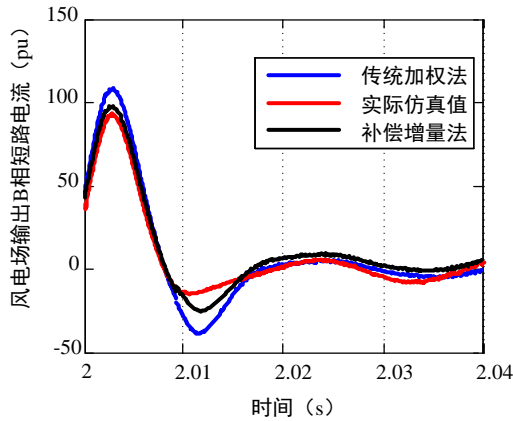


Figure 7. Calculation and simulation results of the short-circuit current of DFIG based wind farm  
图 7. 双馈风电场短路电流计算的验证

暂态输出存在差异是不可避免的, 因此补偿增量法得到的短路电流表达式也存在较小的误差, 但基本能满足继电保护研究及整定计算的应用要求。

### 7. 结论

由于风速波动性和随机性, 使得风电场接入电力系统的台数也会频繁发生变化, 本文在双馈型风电场并网机组数目变化的情况下, 对双馈型风电场的短路电流变化规律进行研究。得到以下主要结论:

1) 建立了双馈风电场的等效电路图。得到不同频率下风电场内部单台风电机组短路电流增量的表达式。双馈风电场中单台风电机组短路电流中直流、转速频率分量的增量实质是由风电场中各个双馈风电机组中直流及转速频率的定子、转子磁链产生的感应电动势相互影响而产生的。而工频分量的增量实质是由于风电场并联方式的分流规律而产生的。

2) 基于短路电流的增量利用补偿增量的方法推导出双馈风电场的短路电流计算式。通过与实际仿真结果对比, 补偿增量法求得的电流表达式较传统的加权法具有更高的精确性, 对于准确评估大容量风电场输出故障电气量, 优化风电机群保护控制具有积极意义。

### 基金项目

国家自然科学基金资助项目(51407017)。

## 参考文献 (References)

- [1] 饶建业, 徐小东, 何肇, 韩小琪. 中外风电并网技术规定对比[J]. 电网技术, 2012(8): 44-49.
- [2] 杨俊友, 崔嘉, 邢作霞, 王海鑫, 王刚. 考虑风电功率预测的分散式风电场无功控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015(13): 8-15.
- [3] 雷虹云. 并网风电场对电力系统动态特性的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- [4] Qin, Z.L., Li, W.Y. and Xiong, X.F. (2011) Estimating Wind Speed Probability Distribution Using Kernel Density Method. *Electric Power Systems Research*, **81**, 2139-2146. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2011.08.009>
- [5] Qin, Z.L., Li, W.Y. and Xiong, X.F. (2013) Generation System Reliability Evaluation Incorporating Correlations of Wind Speeds with Different Distributions. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 551-558. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2012.2205410>
- [6] Marques, G.D. and Sousa, D.M. (2012) Understanding the Doubly Fed Induction Generator during Voltage Dips. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **27**, 421-431. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2012.2189214>
- [7] Ouyang, J.X. and Xiong, X.F. (2014) Research on Short-Circuit Current of Doubly Fed Induction Generator under Non-Deep Voltage Drop. *Electric Power Systems Research*, **107**, 158-166. <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2013.10.008>
- [8] Ouyang, J.X. and Xiong, X.F. (2014) Correlation among the Transient Characteristics of Doubly Fed Induction Generators under Grid Fault. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, **6**.
- [9] Ouyang, J.X. and Xiong, X.F. (2013) Analytical Analysis on Interaction Mechanism of Doubly-Fed Generators under Grid Fault. *5th International Conference on Advanced Power System Automation and Protection*, Jeju.
- [10] 段晓田, 张新燕, 张俊, 杨晓亮. 风电场故障特性仿真研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(6): 57-59.
- [11] 李辉, 赵斌, 史旭阳, 王荷生, 杨超. 含不同风电机组的风电场暂态运行特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 1-7.
- [12] 包能胜, 朱瑞丹, 倪维斗. 双馈型机组风电场三相电网短路故障暂态特性分析[J]. 控制理论与应用, 2008, 25(1): 141-144.
- [13] 常勇, 徐政, 郑玉平. 大型风电场接入系统方式的仿真比较[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 70-75.
- [14] Gerardo, T., Arantxa, T. and Xabier, O.J. (2006) Two Alternative Modeling Approaches for the Evaluation of Wind Farm Active and Reactive Power Performances. *IEEE Transactions of Energy Conversion*, **21**, 909-919. <http://dx.doi.org/10.1109/TEC.2005.859975>
- [15] Zheng, W., Xiong, X.F. and Shen, Z.J. (2013) Dynamic Converter Modeling Using Black-Box Identification Method for Grid-Connected Photovoltaic Systems. *Journal of Computational Information Systems*, **9**, 1-11.
- [16] 钟显, 樊艳芳, 王一波. 双馈集群汇集站主变及送出线路继电保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016(5): 47-54.

## 附 录

①

$$G_{rs} = G_R G_s G_1 / \left( 1 - \frac{L_m R_s}{L_s} G_1 G_s G_R \right) \frac{L_m}{\sigma L_r L_s} \cdot \frac{s + j\omega_{slip}}{\left( s + \frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_1 \right) \left( s + \frac{R'_r}{\sigma L_r} + j\omega_{slip} \right)}$$

$$G_{rr} = G_R / \left( 1 - \frac{L_m R_s}{L_s} G_1 G_s G_R \right) = \frac{1}{\sigma L_r} \cdot \frac{s + R_s / L_s + j\omega_1}{\left( s + \frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_1 \right) \left( s + \frac{R'_r}{\sigma L_r} + j\omega_{slip} \right)}$$

②

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s^f = \left[ \frac{1}{R_s + j\omega_1 L_s} - \frac{j\omega_{slip} \sigma L_m^2}{L_s (R_s + j\omega_1 \sigma L_s) (R'_r + j\omega_{slip} \sigma L_r)} \right] \mathbf{u}_f \\ \mathbf{i}_r^f = \frac{j\omega_{slip} \sigma L_m}{(R_s + j\omega_1 \sigma L_s) (R'_r + j\omega_{slip} \sigma L_r)} \mathbf{u}_f \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s^{dc1} \approx \frac{L_m^2 (R_s / \sigma L_s + j(\omega_1 - \omega_{slip}))}{L_s C_3} \left[ \frac{\mathbf{u}_f}{R_s / \sigma L_s + j\omega_1} - \frac{U_{so}}{j\omega_1} \right] e^{-\left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_1 \right) t} \\ \mathbf{i}_r^{dc1} \approx \frac{L_m (R_s / \sigma L_s + j(\omega_1 - \omega_{slip}))}{C_3} \left[ \frac{U_{so}}{j\omega_1} - \frac{\mathbf{u}_f}{R_s / \sigma L_s + j\omega_1} \right] e^{-\left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_1 \right) t} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s^{dc2} = \left[ \frac{U_{so}}{j\omega_1 L_s} - \frac{\mathbf{u}_f}{R_s + j\omega_1 L_s} \right] e^{-\left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_1 \right) t} \\ \mathbf{i}_r^{dc2} = 0 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathbf{i}_s^{ro} = \left[ \frac{L_m (R'_r / \sigma L_r - R_s / L_s - j(\omega_1 - \omega_{slip}))}{C_3} \boldsymbol{\psi}_r(0) - \frac{L_m^2 R'_r}{\sigma L_s L_r C_3} \left( \frac{\mathbf{u}_f}{R'_r / \sigma L_r + j\omega_{slip}} - \frac{U_{so}}{j\omega_1} \right) \right] e^{-\left( \frac{R'_r}{\sigma L_r} + j\omega_{slip} \right) t} \\ \mathbf{i}_r^{ro} = \left[ \frac{L_m^2 R'_r}{\sigma L_s L_r C_2} \left( \frac{\mathbf{u}_f}{R'_r / \sigma L_r + j\omega_{slip}} - \frac{U_{so}}{j\omega_1} \right) - \frac{L_m (R'_r / \sigma L_r - R_s / L_s - j(\omega_1 - \omega_{slip}))}{C_3} \boldsymbol{\psi}_r(0) \right] e^{-\left( \frac{R'_r}{\sigma L_r} + j\omega_{slip} \right) t} \end{cases}$$

③

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s^f = \frac{\mathbf{u}_f L_s}{R_s + j\omega_1 L_s} \\ \boldsymbol{\psi}_r^f = \frac{j\omega_{slip} \sigma^2 L_m L_r \mathbf{u}_f}{(R_s + j\omega_1 \sigma L_s) (R'_r + j\omega_{slip} \sigma L_r)} + \frac{\mathbf{u}_f L_m}{R_s + j\omega_1 L_s} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s^{dc1} = 0 \\ \boldsymbol{\psi}_r^{dc1} = \frac{\sigma L_r L_m (R_s / \sigma L_s + j(\omega_1 - \omega_{slip}))}{C_3} \left[ \frac{U_{so}}{j\omega_1} - \frac{\mathbf{u}_f}{R_s / \sigma L_s + j\omega_1} \right] e^{-\left( \frac{R_s}{\sigma L_s} + j\omega_1 \right) t} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \boldsymbol{\psi}_s^{dc2} = \left( \frac{U_{so}}{j\omega_1} - \frac{\mathbf{u}_f L_s}{R_s + j\omega_1 L_s} \right) e^{-\left(\frac{R_s + j\omega_1}{L_s}\right)t} \\ \boldsymbol{\psi}_r^{dc2} = \left( \frac{U_{so} L_m}{j\omega_1} - \frac{\mathbf{u}_f L_m}{R_s + j\omega_1 L_s} \right) e^{-\left(\frac{R_s + j\omega_1}{L_s}\right)t} \\ \boldsymbol{\psi}_s^{ro} = 0 \\ \boldsymbol{\psi}_r^{ro} = \left[ \frac{L_m^2 R_r'}{L_s C_2} \left( \frac{\mathbf{u}_f}{R_r' / \sigma L_r + j\omega_{slip}} - \frac{U_{so}}{j\omega_1} \right) - \frac{\sigma L_r L_m (R_r' / \sigma L_r - R_s / L_s - j(\omega_1 - \omega_{slip}))}{C_2} \boldsymbol{\psi}_r(0) \right] e^{-\left(\frac{R_r'}{\sigma L_r} + j\omega_{slip}\right)t} \end{cases}$$

④

$$\begin{cases} R_s^f = R_s; L_{ls}^f = 0; L_m^f = 0 \\ R_r'^f = R_r' = R_r + R_{crowbar}; L_{lr}^f = 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} R_s^{dc1} = R_s; L_{ls}^{dc1} = -(R_s / \sigma L_s + j\omega_1) L_{ls}; L_m^{dc1} = -(R_s / \sigma L_s + j\omega_1) L_m \\ R_r'^{dc1} = R_r'; L_{lr}^{dc1} = -(R_s / \sigma L_s + j\omega_1) L_{lr} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} R_s^{dc2} = R_s; L_{ls}^{dc2} = -(R_s / L_s + j\omega_1) L_{ls}; L_m^{dc2} = -(R_s / L_s + j\omega_1) L_m \\ R_r'^{dc2} = R_r'; L_{lr}^{dc2} = -(R_s / L_s + j\omega_1) L_{lr} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} R_s^{ro} = R_s; L_{ls}^{ro} = -(R_r' / \sigma L_r + j\omega_{slip}) L_{ls}; L_m^{ro} = -(R_r' / \sigma L_r + j\omega_{slip}) L_m \\ R_r'^{ro} = R_r'; L_{lr}^{ro} = -(R_r' / \sigma L_r + j\omega_{slip}) L_{lr} \end{array} \right. \end{cases}$$

⑤

$$\begin{cases} Z_{eq}^f = R_s + j\omega_1 L_s \\ U_{oc}^f = 0 \\ \left\{ \begin{array}{l} Z_{eq}^{dc1} = R_s + L_{ls}^{dc1} + \frac{L_m^{dc1} (R_r' + L_{lr}^{dc1})}{L_m^{dc1} + L_{lr}^{dc1} + R_r'} \\ U_{oc}^{dc1} = \frac{j\omega_{slip} \boldsymbol{\psi}_r^{dc1} L_m^{dc1}}{L_m^{dc1} + L_{lr}^{dc1} + R_r'} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} Z_{eq}^{dc2} = R_s + L_{ls}^{dc2} + \frac{L_m^{dc2} (R_r' + L_{lr}^{dc2})}{L_m^{dc2} + L_{lr}^{dc2} + R_r'} \\ U_{oc}^{dc2} = j\omega_s \boldsymbol{\psi}_s^{dc2} + \frac{j\omega_{slip} \boldsymbol{\psi}_r^{dc2} L_m^{dc2}}{L_m^{dc2} + L_{lr}^{dc2} + R_r'} \end{array} \right. \\ \left\{ \begin{array}{l} Z_{eq}^{ro} = R_s + L_{ls}^{ro} + \frac{L_m^{ro} (R_r' + L_{lr}^{ro})}{L_m^{ro} + L_{lr}^{ro} + R_r'} \\ U_{oc}^{ro} = \frac{j\omega_{slip} \boldsymbol{\psi}_r^{ro} L_m^{ro}}{L_m^{ro} + L_{lr}^{ro} + R_r'} \end{array} \right. \end{cases}$$

⑥ 双馈型风电场系统参数：额定功率P为1.5 MW；转子电阻R<sub>r</sub>为0.0172 p.u；无功功率Q为0 kVar；激磁电感L<sub>m</sub>为2.91 p.u；额定电压U<sub>s1</sub>为575 V；定子漏感L<sub>ls</sub>为0.264 p.u；额定频率f为50 Hz；转子漏感L<sub>lr</sub>



为0.2838 p.u; 定/转子绕组匝比为0.613; 撬棒电阻  $R_{crowbar}$  为1 p.u; 箱变额定电压: 575 V/10 kV; 风电场主变额定电压为10.5 kV/110 kV; 箱变额定容量为1.75 MW; 风电场主变额定容量为100 MW; 箱变额定电感为0.0022736 H/0.0025057 H; 风电场主变额定电感为0.065558 H/0.05418 H; 10 kV集电线电阻为0.153  $\Omega$ /km; 110 kV联络线电阻为0.153  $\Omega$ /km; 10 kV集电线电感为0.000404 H/km; 110 kV联络线电感为0.000404 H/km。