

DOI: 10.7652/xjtuxb201510001

直驱风机三相短路电流特性分析

宋国兵¹, 常仲学¹, 王晨清¹, 李端祯¹, 豆敏娜¹, 刘凯²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. ABB(中国)有限公司研究中心, 100015, 北京)

摘要: 为了深入分析直驱风机的故障特征,提出了直驱风机的网侧变流器简化模型和含卸荷电路的控制器外特性模型。网侧变流器是一个控制作用下的电能平衡系统,主要研究元件的功能和外特性,忽略网侧变流器的复杂结构,解析直驱风机的短路电流,实际是分析风机端电压跌落作用下的三相电流响应规律。与详细模型进行对比验证,结果表明:当卸荷电路不投入时,直驱风机短路电流稳态值与其输出功率和电压跌落程度有关,除含有工频分量外还有与控制参数相关的衰减频率分量,短路电流呈现先逐渐增大后再减小到稳态值的趋势,随着电压跌落程度的加深,短路电流最大值增加且达到最大值的时间也增加,暂态衰减过程延长;当卸荷电路投入时,短路电流为变流器输出电流的上限。提出的方法有效表征了直驱风机故障特性,对分析逆变型分布式电源的故障特征及其继电保护相关问题具有借鉴意义。

关键词: 继电保护;直驱风机;卸荷电路;三相短路电流

中图分类号: TM77 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)10-0001-07

Three-Phase Fault Current Characteristics of Permanent Magnet Synchronous Generator

SONG Guobing¹, CHANG Zhongxue¹, WANG Chenqing¹, LI Duanzhen¹, DOU Minna¹, LIU Kai²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. ABB (China) Limited Corporate Research Center, Beijing 100015, China)

Abstract: To analyze the permanent magnet synchronous generator (PMSG) fault characteristics, a simplified model of grid-side converter and external characteristics model of controller with chopper are proposed. Grid-side converter is an electric energy balance system under controlling action, its complex structure is ignored and the function and external characteristics are retained only. To reveal the PMSG short-circuit current is to analyze the three-phase current response under the action of turbine terminal voltage sag. A comparison with detailed model indicates that when chopper circuit does not operate, the value of PMSG current is determined by its output power and the degree of voltage sag; besides 50 Hz component, there are components whose frequencies are related to the control parameters; the fault current firstly increases gradually and then decreases to a steady value; with the increasing voltage sag degree, the maximum fault current gets greater and the corresponding period and transient decay time become longer; when chopper circuit operates, the fault current is just the maximum converter current.

Keywords: relay protection; permanent magnet synchronous generator; chopper circuit; three-phase fault current

近年来,直驱风机因其众多优点在电力系统中得到了大量应用^[1],随着接入系统的风电容量不断提高,其对电网造成的影响已经不可忽略^[2-3]。继电保护作为电力系统安全可靠运行的第一道防线,当电网发生故障时能够快速有效地识别并切除,对于电网的正常运行具有重要意义。

故障特征分析是继电保护研究的基础,在风电故障特征分析的3种方法中^[4],目前还仅仅停留在仿真的层面,鲜有文献通过相应的人工实验和故障录波验证仿真,也没有理论推导直驱风机短路电流的表达式。各种仿真的目的大致可以分为2类:①给出故障后直驱风机各电气量的波形,定性地说明确对继电保护的影响^[5-6];②根据直驱风机的故障特征优化低电压穿越控制策略^[7-9]。文献[5]仿真了单台直驱风机故障情况下的电流及其他电气量的变化情况,并给出因为变流器的隔离作用使得电网和风机之间相互影响不大的结论。文献[6]仿真了不对称短路情况下的各相短路电流以及零序电流,并分析了对继电保护的影响。文献[7-8]仿真了故障后在不同情况下直驱风机的有功、无功功率、电流和直流母线电压,并说明了低电压穿越的有效性。文献[9]提出了直驱风机新的控制算法,指出电流控制快于电压控制。继电保护关注的是短路电流的分量及其频率、衰减速度等,但仿真并不能得到这些信息,从而不能满足继电保护的相关需要。理论推导即能定性地解析出相关短路电流的分量和变化规律,也能定量地给出各分量的大小等,所以对直驱风机短路电流的理论解析必不可少。

因为直驱风机是通过背靠背的变流器并入电网,所以其故障特征的分析重点必然落在网侧变流器上。当系统发生故障时,相关控制及低电压穿越策略作用于网侧变流器,导致其暂态成为一个复杂的强耦合高阶时变过程,这样数学解析其短路电流表达式就需要合理的近似简化。

基于此,本文首先对网侧变流器及其控制进行了相应简化,然后根据变流器输入输出电能守恒,列写相关方程,推导了直驱风机的短路电流近似表达式,在此基础上分析了短路电流的相关特性。PSCAD/EMTDC 仿真验证了结论的正确性。

1 网侧变流器简化

工程中对于复杂的耦合系统需要解耦控制,这样不但避免了各被控量之间的相互干扰,同时也为理论分析带来了方便。在分析高阶系统时,一般根

据闭环极点的概念将其简化成二阶系统^[10]。

1.1 网侧变流器的特点

变流器的复杂性主要在于其控制电路的复杂性,对于电力系统工作者,关心的是元件的功能和外特性,忽略网侧变流器的复杂结构,其简化的拓扑结构如图1所示。

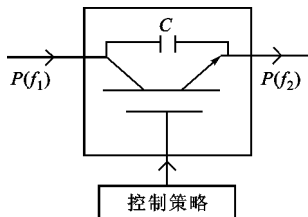


图1 变流器简化拓扑结构图

根据图1,网侧变流器的特点可以总结如下。

(1)电能变换。网侧变流器的主电路实际是一个功率变换器件,功能是将某频率的电能变换成另一频率的电能。当忽略变流器的开关损耗时,满足 $P(f_1)=P(f_2)$,即变流器满足电能平衡。

(2)特性受控。除了主电路外,变流器还有控制电路,而正是控制电路决定了变流器的输出特性,所以变流器的暂态特性主要取决于变流器的控制策略。

综上,网侧变流器实际是一个控制作用下的电能平衡系统,解析直驱风机的短路电流,实际是分析机端电压跌落作用下的三相电流响应规律,即

$$i_{\phi} = f(u_{\phi}, \mathbf{K}) \quad (1)$$

式中: ϕ 为a、b、c,表示a、b、c三相; $\mathbf{K}=[k_1, k_2, k_3, \dots, k_n]^T$,表示变流器控制电路的 n 个控制参数。式(1)表明,不同的控制策略及参数和机端电压跌落程度将导致短路电流特性的差异。

1.2 网侧变流器的解耦控制

目前,变流器的控制都是基于 dq 旋转坐标轴设计的,其一般采用电网电压矢量定向控制,当电压矢量定向于 d 轴时,有

$$u_d = u_s; u_q = 0 \quad (2)$$

式中: u_s 为电网电压; u_d 为电网电压的直轴分量; u_q 为电网电压的交轴分量。

此时网侧变流器发出的有功、无功功率可以表示为

$$P = \frac{3}{2} u_d i_d; Q = -\frac{3}{2} u_d i_q \quad (3)$$

式(3)实现了直驱风机有功、无功功率的解耦控制。当电网电压一定时,有功功率与 i_d 成正比,无功功率与 i_q 成正比,所以通常 i_d 被称为有功电流, i_q 被称为无功电流。当电网正常运行时,直驱风机

不需要向电网发出无功功率,即 $i_q = 0$,也就是说电网运行在单位功率因数。当电网发生故障时,风机将按相关标准重新给定 i_q 的参考值,以向电网注入无功功率来支撑电网电压^[11]。

1.3 控制的降阶处理

直驱风机网侧变流器采用直流电压外环和有功电流、无功电流内环组成的典型双环控制策略^[12]。网侧变流器的直流侧输入瞬时功率为 $u_{dc} i_{dc}$,当忽略变流器损耗时,满足 $u_{dc} i_{dc} = 3u_d i_d / 2$ 。在电网电压不变的情况下,直流母线电压 u_{dc} 与有功电流 i_d 成正比,从而可以通过 i_d 来控制 u_{dc} ,引入直流电压反馈并通过 PI 调节器就可以实现直流电压 u_{dc} 的无静差控制,而 PI 调节器的输出量就是有功电流的参考值 i_d^* 。直流电压外环控制如图 2 所示。

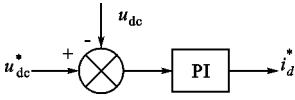


图 2 直流电压外环控制示意图

根据直流电压外环可得

$$i_d = k_{up}(u_{dc} - u_{dc}^*) + k_{ui} \int (u_{dc} - u_{dc}^*) dt \quad (4)$$

式中: k_{up} 、 k_{ui} 为电压外环比例和积分系数; u_{dc}^* 为直流母线电压参考值。

电流内环是将网侧变流器的输出电流经过坐标变换之后,将其与电压外环得到的有功、无功电流参考值比较,并分别经过 PI 调节器实现 i_d 、 i_q 的无静差控制。电流内环如图 3 所示,无功电流的参考值 i_q^* 由向电网输送的无功功率决定。

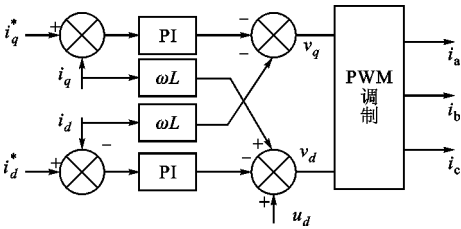


图 3 电流内环解耦控制示意图

根据电流内环可得

$$u_d = k_{ip}(i_d^* - i_d) + k_{ii} \int (i_d^* - i_d) dt - \omega L i_q + v_d \quad (5)$$

$$u_q = k_{ip}(i_q^* - i_q) + k_{ii} \int (i_q^* - i_q) dt + \omega L i_d + v_q \quad (6)$$

式中: k_{ip} 、 k_{ii} 分别为电流内环比例和积分系数; i_d^* 、 i_q^* 为有功、无功电流参考值; v_d 、 v_q 为变流器交流侧直轴和交轴电压。联立式(4)、式(5)就可以看出有功电流 i_d 为四阶系统,无功电流 i_q 满足二阶系统。

由于电流内环的响应速度特别快,也就是说有功电流是严格跟随其参考值的^[12],即 $i_d = i_d^*$ 。此时电流内环被忽略,有功电流 i_d 成为二阶系统。

2 短路电流的推导

网侧变流器经过解耦之后,要解析 i_ϕ 就必须首先求解 i_d 和 i_q ,公式如下

$$i_d = f(u_d, K); i_q = f(u_q, K) \quad (7)$$

当式(7)求解完成之后就可以通过派克逆变换得到 i_ϕ 了。

将有功电流 i_d 、无功电流 i_q 看成二阶响应处理,首先需要将二者写成标准的二阶微分方程形式^[10]

$$\frac{d^2 y(t)}{dt^2} + \frac{1}{T} \frac{dy(t)}{dt} + \frac{K}{T} y(t) = \frac{K}{T} x(t) \quad (8)$$

然后根据式(8)就可以直接写出响应表达式,进而推导出三相电流的表达式。

2.1 有功电流

实际上,在机端电压跌落的过程中,风机会通过桨距角控制来调节输出功率,但这个过程相对较慢,在下面的推导中近似认为风机输出功率不变。

忽略变流器的功率损耗,网侧变流器的功率平衡方程式为

$$P - \frac{3}{2} u_d i_d = u_{dc} C \frac{du_{dc}}{dt} \quad (9)$$

式中: P 为直驱风机输出功率; C 为直流母线电容。

对式(4)两边求导并结合式(9),可得

$$\frac{di_d}{dt} = \frac{k_{up}}{Cu_{dc}} \left(P - \frac{3}{2} u_d i_d \right) + k_{ii} (u_{dc} - u_{dc}^*) \quad (10)$$

对式(10)求导

$$\frac{d^2 i_d}{dt^2} + \frac{3k_{up} u_d}{2Cu_{dc}^*} \frac{di_d}{dt} + \frac{3k_{ii} u_d}{2Cu_{dc}^*} i_d = \frac{3k_{up} u_d}{2Cu_{dc}^*} \frac{2P}{3u_d} \quad (11)$$

此时式(11)的形式和式(8)相同,令 $T = 2Cu_{dc}^* / 3k_{up} u_d$ 、 $K = k_{ii} / k_{ip}$,当机端电压发生对称电压跌落时,可认为 i_d 的响应为零输入响应和 $2P/3u_d$ 倍阶跃响应的叠加。根据二阶系统的响应, i_d 的表达式为

$$i_d = \frac{2P}{3u_d} + \left[i_d(0) - \frac{2P}{3u_d} \right] \frac{1}{(1 - \xi^2)^{1/2}} \cdot e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \alpha) \quad (12)$$

式中: $i_d(0)$ 为故障前的有功电流; $\xi = k_{up} (3u_d)^{1/2} / 2(2Cu_{dc}^* k_{ii})^{1/2}$; $\omega_n = (3k_{ii} u_d / 2Cu_{dc}^*)^{1/2}$; $\omega_d = \omega_n (1 - \xi^2)^{1/2}$; $\alpha = \arctan((1 - \xi^2)^{1/2} / \xi)$ 。

2.2 无功电流

根据文献[12],有

$$u_q = L \frac{di_q}{dt} + Ri_q + \omega Li_d + v_q \quad (13)$$

式中: L 、 R 为网侧滤波器的等效电感和电阻。式(13)实际是网侧变流器并网后经过派克变换后的 KVL 方程。

结合式(6)、式(13),忽略滤波器电阻 R 并对 i_q 求导,得

$$\frac{d^2 i_q}{dt^2} + \frac{k_{ip}}{L} \frac{di_q}{dt} + \frac{k_{ii}}{L} i_q = \frac{k_{ii}^*}{L} i_q^* \quad (14)$$

此时式(14)的形式与式(8)相同,令 $T=L/k_{ip}$, $K=k_{ii}/k_{ip}$,当电网故障时,无功电流是 i_q^* 倍的阶跃响应。根据二阶系统的响应, i_q 的响应表达式为

$$i_q = i_q^* \left[1 - e^{-\frac{k_{ip}}{2L}t} \frac{2(Lk_{ii})^{1/2}}{(4k_{ii}L - k_{ip}^2)^{1/2}} \cdot \sin\left(\frac{(4k_{ii}L - k_{ip}^2)^{1/2}}{2L}t + \beta\right) \right] \quad (15)$$

式中: $\beta = \arctan((1 - \xi^2)^{1/2}/\xi)$, $\xi = k_{ip}/2(Lk_{ii})^{1/2}$ 。

无功电流的参考值满足^[11]

$$i_q^* \geq 1.5(0.9 - u_{d*})I_N \quad (16)$$

式中: u_{d*} 为网侧电压标么值; I_N 为直驱风机的额定电流。

2.3 三相电流

已知网侧变流器的有功、无功电流,根据派克逆变换,就可以将 dq 旋转坐标系的电流变换为 abc 三相坐标系的电流^[13],表达式如下

$$i_{abc} = \mathbf{p}^{-1} i_{dq0} \quad (17)$$

式中: $\mathbf{p}^{-1}$ 为派克逆变换矩阵。所以有

$$i_\phi = \frac{2P}{3u_d} \cos(\omega t + \theta) - i_q^* \sin(\omega t + \theta) + \left[i_d(0) - \frac{2P}{3u_d} \right] \frac{1}{(1 - \xi^2)^{1/2}} e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \alpha) \cos(\omega t + \theta) + i_q^* e^{-\frac{k_{ip}}{2L}t} \frac{2(Lk_{ii})^{1/2}}{(4k_{ii}L - k_{ip}^2)^{1/2}} \cdot \sin\left(\frac{(4k_{ii}L - k_{ip}^2)^{1/2}}{2L}t + \beta\right) \sin(\omega t + \theta) \quad (18)$$

当 ϕ 为 a 时, $\theta = \theta_0$, θ_0 为故障时刻的电流相位;当 ϕ 为 b 时, $\theta = \theta_0 - 120^\circ$;当 ϕ 为 c 时, $\theta = \theta_0 + 120^\circ$ 。

2.4 低电压穿越过程中的短路电流

以上推导得到的短路电流表达式实际是机端电压跌落程度不大的条件下得出的,当直驱风机的卸荷电路动作后将不再成立。这是因为直驱风机网侧变流器的通流能力是一定的,当电网发生扰动时,如

果电压跌落幅度不大,则短路电流在变流器的通流能力内,此时风机产生的电能可全部通过网侧变流器输出,直流侧电容两端的电压波动不足以使卸荷电路投入。当机端电压跌落幅度较大时,限于变流器的通流能力,直流母线电压大幅上升,这时通过控制投入卸荷电路,吸收多余能量,以保证直流母线电压稳定。所以卸荷电路动作后,直驱风机三相短路电流的暂态过程由于网侧变流器的通流能力而被强行限制,其值就是变流器的最大输出电流。

此时,有功电流 i_d 满足

$$i_d = (i_{\max}^2 - i_q^{*2})^{1/2} \quad (19)$$

式中: $i_{\max}$ 为网侧变流器能够输出的最大电流。无功电流 $i_q = i_q^*$, i_q^* 满足式(16)。

三相电流 i_ϕ 满足

$$i_\phi = (i_{\max}^2 - i_q^{*2})^{1/2} \cos(\omega t + \theta) - i_q^* \sin(\omega t + \theta) \quad (20)$$

式中: θ 的取值同式(18)。

3 短路电流特性分析

3.1 有功电流

暂态特性:据二阶系统的动态响应性能指标,最大超调量 σ_p 可以表征暂态电流的最大值,峰值时间 t_p 可以描述暂态电流的响应速度及频率。根据式(12),有功电流最大超调量和峰值时间与网侧电压降落程度 Δu_d 的关系如图4所示。

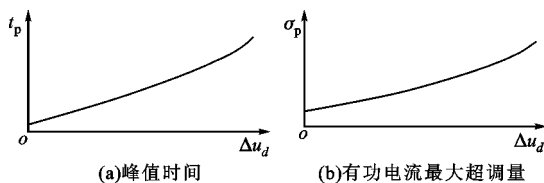


图4 t_p 和 σ_p 与 Δu_d 的关系

从图4可以看出,随着机端电压跌落程度的加深,最大超调量和峰值时间增大,表明随着机端电压跌落程度的加深有功电流的最大值以及到达最大值的时间都增大。

稳态特性:直驱风机网侧变流器通流能力一般为其额定电流的1.5~2.0倍,当电压跌落到0.2倍的额定电压以下时风机将脱网,不再为电网提供短路电流^[1]。直驱风机的稳态有功电流与机端电压之间的关系见图4。

图5中有功电流在某一电压处发生突变,这个突变电压就是短路电流幅值达到了变流器的通流能

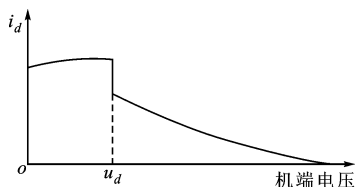


图 5 有功电流幅值与机端电压的关系

力后使得卸荷电路投入的电压。当机端电压大于此突变电压时,卸荷不投入,且随着机端电压的增加,风机输出的有功电流减小;当小于此突变电压时,卸荷电路投入,随着机端电压的减小,有功电流减小。这是因为机端电压越小,无功电流越大,从而有功电流越小。需要指出的是,突变电压是根据网侧变流器通流能力的不同而不同的。

3.2 无功电流

暂态特性:电流内环相对于电压外环响应速度非常快,所以无功电流的暂态持续时间相对于有功电流非常短,对三相电流的暂态过程影响较小,此处不做讨论。

稳态特性:据式(16)可知,电网发生故障时的直驱风机发出的无功电流与机端电压的关系见图 6。

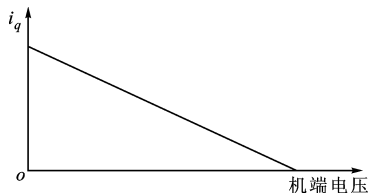


图 6 无功电流幅值与机端电压的关系

从图 6 可以看出,在风机低电压穿越过程中无功电流与机端电压成线性关系,电压跌落程度越大,直驱风机的无功电流越大。

3.3 三相电流

暂态特性:从式(18)可以看出,直驱风机短路电流暂态分量初值与其输出功率以及电压跌落程度有关。暂态分量包含两部分,第一部分衰减时间常数、频率与变流器电压外环控制参数、电压跌落程度有关;第二部分衰减时间常数、频率与电流内环控制参数相关。

稳态特性:从式(18)可以看出,直驱风机短路电流的稳态分量与其输出功率以及电压跌落深度有关。图 7 为三相短路电流稳态幅值与机端电压的关系。

从图 7 可以看出,在一定范围内直驱风机输出的三相短路电流幅值与机端电压成反比关系,当机端电压跌落到某一数值以后,直驱风机输出电流幅值将保持不变,为变流器的最大输出电流 $i_{\max}$ 。

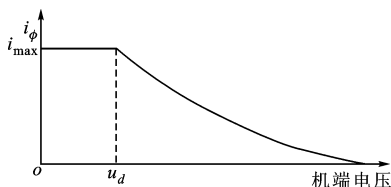


图 7 三相电流幅值与机端电压的关系

4 仿真验证

在 PSCAD/EMTDC 中搭建直驱风机模型,如图 8 所示。风机采用恒功率控制,功率以流进风机为正方向。PMSG 的容量为 $1.5 \text{ MV} \cdot \text{A}$,定子电阻 $R=0.0051 \Omega$,交轴电抗 $X_q=0.3314 \Omega$,直轴电抗 $X_d=0.1657 \Omega$;机侧滤波电感为 0.001 H ,变流器的通流能力为 2.5 kA ,风机输出功率 $P=-0.7 \text{ MW}$;网测滤波电感 $L=0.001 \text{ H}$,直流侧电容 $C=0.01 \text{ F}$,直流母线参考电压 $u_{dc}^*=1.5 \text{ kV}$,电源 S 为受控的理想电压源,正常运行时其电压为 0.69 kV ,通过改变控制端的电压就可以实现三相对称故障。实验时仿真步长为 0.1 ms 。

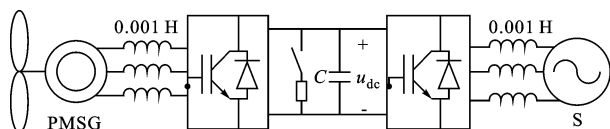


图 8 仿真模型示意图

4.1 短路电流表达式验证

通过设置相应三相对称故障,得到有功电流、无功电流和三相电流波形,并将参数代入理论推导表达式得出相应波形,比较两组波形,来验证所得表达式的正确性。

选取两组控制参数,当 $t=0.1 \text{ s}$ 时发生三相电压跌落,两组控制参数对应的电压跌落不同。

(1)直流电压外环控制参数 $k_{up}=2$ 、 $k_{ui}=200$,电流内环控制参数 $k_{ip}=2$ 、 $k_{ii}=4000$,机端电压跌落至 $u_d=0.41 \text{ kV}$,波形如图 9、图 10 所示。

(2)直流电压外环控制参数 $k_{up}=1.5$ 、 $k_{ui}=100$,电流内环控制参数为 $k_{ip}=3$ 、 $k_{ii}=5000$,直驱风机机端电压跌落至 $u_d=0.35 \text{ kV}$,波形见图 11、图 12。

以第二组控制参数为例,直驱风机机端电压跌落至 $u_d=0.15 \text{ kV}$ 时,超过了网侧变流器的通流能力,卸荷电路投入。此过程的具体波形如图 13 所示。

由图 9、图 11 可以看出,有功、无功电流基本满足二阶响应,无功电流响应非常快,故障后很快进入稳态,而有功电流响应相对较慢。根据对比,理论计

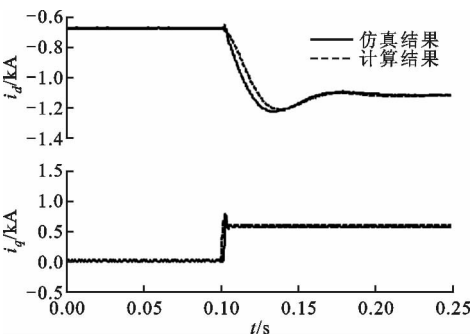


图 9 直驱风机有功、无功电流仿真和计算结果对比

算所得的有功电流和无功电流与仿真所得波形基本重合,说明了推导所得响应表达式的正确性。图 9 中有功电流的峰值时间大约为 0.13 s,最大超调量大约为 9.8%,图 11 中有功电流峰值时间大约是 0.15 s,超调量大约为 11%,说明有功电流的峰值时间和超调量都是随着机端电压跌落程度的加深而增大的。

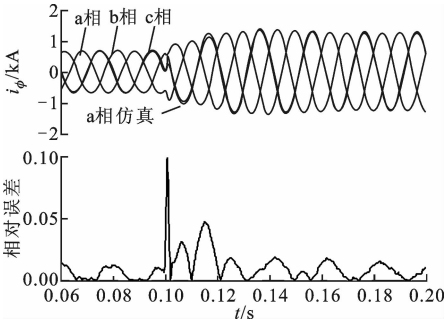


图 10 直驱风机三相电流及 a 相电流相对误差

由图 10、图 12 可以看出,理论推导所得电流与仿真所得三相短路电流之间存在误差。造成误差的主要原因是推导有功电流的过程中忽略了电流内环以及变流器的损耗,但是相对误差控制在 10% 以内,且随着过渡过程的结束,相对误差呈现减小趋势,所以认为近似合理。同时,三相短路电流的变化趋势是先逐渐增大,到达最大值之后逐渐减小到稳态值。

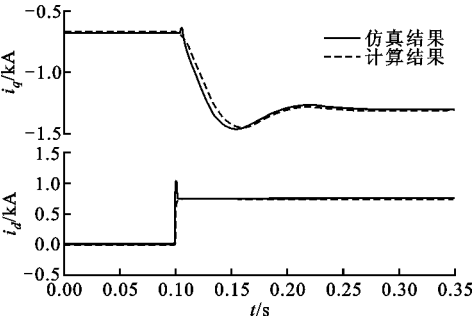


图 11 直驱风机有功、无功电流仿真和计算结果对比

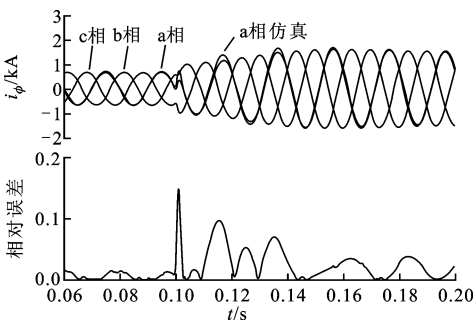


图 12 直驱风机三相电流及 a 相电流相对误差

从图 13 可以看出,有功电流的暂态过程被限制,如果不限幅值,其为 3.1 kA,加了限幅之后只有 2 kA,且因为卸荷电路的开关动作特性,略有纹波。无功电流略有波动之后达到稳定,三相电流幅值达到变流器的最大输出值。

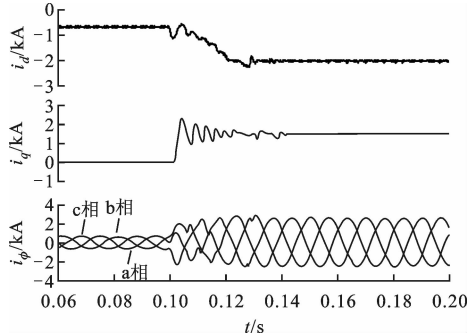


图 13 低电压穿越时的有功、无功及三相电流波形

4.2 短路电流特性验证

选取 4.1 节中的第一组控制参数,使机端电压分别降到 0.41 kV 和 0.35 kV,根据式(18),直驱风机暂态电流分量如图 14 所示。

从图 14 中可以看出,随着电压跌落程度的加深,暂态分量最大值增大且到达最大值的时间略有增加,整个暂态过程延长。这就表明三相短路电流随着电压跌落程度的加深,其最大值增大且到达最大值的时间也增加,整个暂态过程延长。此特点与前文所述有功电流的特点相同,表明直驱风机的三

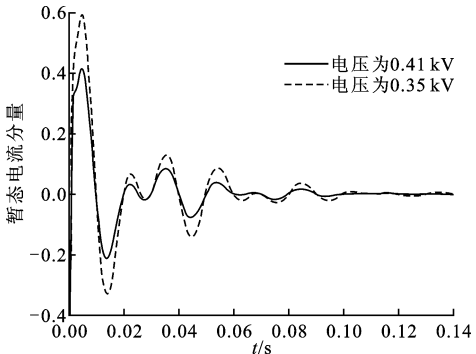


图 14 直驱风机暂态电流分量

相电流暂态特性主要取决于响应速度较慢的有功电流特性,同时也再次表明了忽略电流内环的合理性。

5 结 论

直驱风机网侧变流器是一个控制作用下的电能平衡系统,在对其进行合理的简化之后,得出三相短路电流的近似表达式。理论推导和仿真结果表明:

(1)直驱风机机端电压跌落、卸荷电路不投入时有功电流可降为二阶响应,无功电流满足二阶响应,有功电流的超调量和峰值时间随着机端电压的升高而减小,响应速度较慢,无功电流响应速度非常快;

(2)直驱风机短路电流的稳态值与其输出功率以及电压跌落程度有关,暂态分量的频率、衰减时间常数与网侧变流器控制参数有关;

(3)直驱风机三相短路电流呈现先逐渐增大到达最大值后逐渐减小到稳态值的趋势,三相短路电流随着电压跌落程度的加深,其最大值增大且到达最大值的时间也增大,整个暂态过程延长。

参考文献:

- [1] 李建林, 许洪华. 风力发电系统低电压运行技术 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 16-29.
- [2] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Liying, YE Tinglu, XIN Yaozhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [3] 迟永宁, 刘燕华, 王伟胜, 等. 风电接入对电力系统的影响 [J]. 电网技术, 2007, 31(3): 77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system [J]. Power System Technology, 2007, 31(3): 77-81.
- [4] 王晨清, 宋国兵, 刘凯, 等. 突变量保护对风电接入系统的适应性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5485-5492.
WANG Chenqing, SONG Guobing, LIU Kai, et al. Adaptability analysis of fault component protection of power systems with wind farms [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5485-5492.

- [5] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性 [J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153-158.
LI Ran, GAO Qishan, LIU Wei. Characteristics of direct-driven permanent magnet synchronous wind power generator under symmetrical three-phase short-circuit fault [J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 153-158.
- [6] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 风力发电机集团式接入电力系统的故障特征分析 [J]. 电网技术, 2012, 36(7): 176-183.
ZHANG Baohui, WANG Jin, LI Guanghui, et al. Analysis on fault features of wind turbine generators concentratedly connected to power grid [J]. Power System Technology, 2012, 36(7): 176-183.
- [7] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压运行特性的分析 [J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Analysis on the low voltage ride through capability of direct drive permanent magnetic generator wind turbines [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(17): 73-77.
- [8] 胡书举, 李建林, 许洪华. 直驱风电系统变流器建模和跌落特性仿真 [J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 949-954.
HU Shuju, LI Jianlin, XU Honghua. Modeling on converters of direct driven wind power system and its performance during voltage sags [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 949-954.
- [9] ABEDINI A, NASIRI A. PMSG wind turbine performance analysis during short circuit faults [C] // Electrical Power Conference 2007. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 160-165.
- [10] 杨平, 翁思义, 郭平. 自动控制原理 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2006: 84-93.
- [11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. B/T 19963—2011 风电场接入电力系统技术规定 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2011.
- [12] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003: 89-99.
- [13] 何仰赞, 温增银. 电力系统分析 [M]. 3 版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002: 53-55.

(编辑 杜秀杰)