

DOI: 10.7652/xjtuxb201504005

一种含变流器电力元件的短路电流计算方法

申全宇¹, 杨忠礼², 宋国兵¹, 王晨清¹, 李端祯¹, 杨黎明¹, 汤海雁³

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 河南新乡供电公司, 453002, 河南新乡;

3. 中国电力科学研究院, 100192, 北京)

摘要: 从继电保护分析计算的角度,给出了一种含变流器电力元件的短路电流的计算方法。该方法分析了变流器的基本功能与控制策略,对其交流侧故障后的暂态响应过程进行了简化分析,通过定性分析和定量推导,阐述了含变流器电力元件故障响应的变化规律,推导出了变流器交流侧输出电流在故障暂态期间的近似解析表达式。仿真结果表明,短路电流近似表达式具有较高的计算精度,变流器可以等效为一个含有控制、实现交直流之间电能变换的受控元件,其控制策略以及控制参数决定了故障暂态的响应特性。研究成果从理论上揭示了控制特性对变流器故障特征的关键作用,为含变流器电力系统的故障特征分析及其继电保护整定计算奠定了基础。

关键词: 变流器;短路电流;计算方法;继电保护

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)04-0024-08

Short-Circuit Current Computation Method for Electric Elements with Converter

SHEN Quanyu¹, YANG Zhongli², SONG Guobing¹, WANG Chenqing¹, LI Duanzhen¹,
YANG Liming¹, TANG Haiyan³

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xinxiang Power Supply Company, Xinxiang, Henan 453002, China; 3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: In view of the protective relay based on fundamental frequency, a novel short-circuit current computation method for electric elements with converter during transient fault process is proposed, where the basic functions, controlling peculiarity and complex transient process of the converter are simplified. The response characteristic of the element with converter in AC side fault is revealed by qualitative and quantitative analysis on the output variation rules, thus the approximately analytic expression of transient response is obtained. The simulation shows that the novel short-circuit current calculation method has a high accuracy, the converter is regarded as an equivalent controlled component with AC-DC power conversion function, and the transient response of the converter depends on the control strategy and control parameters. The control characteristic plays an important role in the fault response of the converter.

Keywords: converter; short-circuit current; computation method; protective relay

通过对电力元件的控制,实现电能生产环节的
自动化、智能化是电网运行者不变的追求。要想实

现这一目标,必须对电力元件进行调节和控制。随
着现代科学技术的不断发展和提高,为实现电力元

收稿日期: 2014-07-04。 作者简介: 申全宇(1989—),男,硕士生;宋国兵(通信作者),男,教授。 基金项目: 国家重点基础研究发展计划资助项目(2012CB215105)。

网络出版时间: 2015-02-27

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20150227.0846.011.html>

由图1可以看出,变流器主要由大量电力电子器件搭建的主电路和复杂控制框图构成的控制电路两部分构成。进一步对图1进行抽象简化分析,则变流器可以等效为图2所示的电力元件。

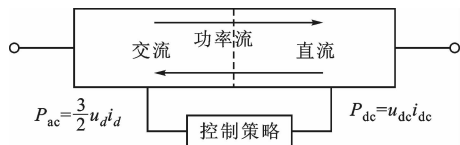


图2 变流器简化拓扑结构图

变流器基本功能具体分析如下。

(1) 电能变换。变流器的主电路相当于一个电能变换元件,沟通交直流系统,其主要功能为实现交直流间电能的变换与传递。当忽略变流器内部损耗时,流入变流器的功率应该等于流出变流器的功率,即两端的功率应该保持平衡。

(2) 特性受控。控制策略用以控制主电路,实现对电能变换过程的调节和控制,保证主电路按照既定指令进行电能变换。因此,含变流器电力元件的响应特性主要由控制回路的特性决定,控制策略的不同,将决定含变流器电力元件故障特征与暂态响应特性的不同。

变流器的主要功能可以总结为实现交直流系统间电能的变换与传递过程,具体动态调节与响应规律取决于控制特性。

1.2 变流器控制策略分析

目前,变流器普遍采用基于矢量定向原理的恒功率控制,将有功功率和无功功率进行解耦,保证变流器交流侧频率和电压在一定范围内变化时输出功率保持不变。该原理采用双闭环控制,可以提高变流器的静态性能,降低电流对变流器参数的敏感程度,增强电流系统的鲁棒性^[18]。

变流器定向矢量控制策略一般在两相旋转坐标系下进行,将 d 轴定向于交流侧电压矢量,此时交流侧在 dq 坐标下功率表达式可以表示为

$$\begin{cases} P = u_d i_d \\ Q = u_d i_q \end{cases} \quad (1)$$

由式(1)可以知道,交流侧有功功率只与 i_d 有关,无功功率只与 i_q 有关,从而在 dq 坐标下实现了有功和无功的解耦控制,具体控制策略如图1所示。根据变流器控制策略,可以分析得到如下结论。

(1) 典型变流器控制策略采用定向矢量控制,实现有功与无功的解耦控制,保证交流侧功率因数可以调节。

(2) 有功电流参考指令由直流电压外环得到,保

证变流器母线电压稳定以及两侧有功功率的平衡。

(3) 电流内环主要作用是跟踪电流参考指令,得到需要调制输出的电压指令,然后通过 PWM 调制,对变流器开关进行控制,得到满足要求的稳定输出。

(4) 电流内环需要快速跟踪外环输出,其调节速度一般比较快,因此电压外环对控制电路特性起着决定性的作用。

综上分析可知,故障暂态时间一般较短,认为输入变流器功率近似保持不变,当交流侧电压发生跌落后,控制电路通过调节交流电流实现变流器两侧功率的平衡,即变流器故障响应本质上是控制电路对其输出电流的调节过程。因此,含变流器电力元件的故障响应规律应该决定于控制策略的调节特性。

2 变流器故障特性理论分析

2.1 变流器故障特性定性分析

变流器交流侧一般采用单位功率因数输出,即 $i_q = 0$,因此本文仅考虑变流器输出有功电流 i_d 的响应特性。在正常工作状态下,变流器处于静态,控制电路对变流器的电能变换过程一般不进行调节,两侧以恒定功率进行交换。当不计变流器自身功率损耗时,其两侧输入、输出满足能量守恒定律,即

$$P_{dc} - \frac{3}{2} u_d i_d = 0 \quad (2)$$

由此可以得到,恒功率控制下变流器静态工作特性曲线如图3所示,图中 i_d 和 U_d 均为标幺值。

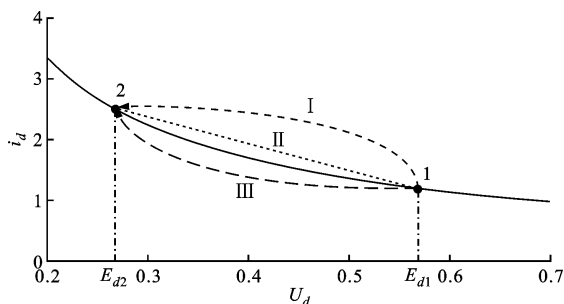


图3 变流器静态特性曲线

在正常情况下,变流器工作在静特性曲线上的1点, dq 坐标下其端口电压为 E_{d1} ,故障后其端口电压跌落到 E_{d2} ,则变流器工作点最终落在静态特性曲线上 E_{d2} 对应的2点。因此,故障前后变流器工作点发生了改变,且仅取决于变流器静态特性,不随时间发生变化,体现了变流器的故障稳态响应特性。

在故障暂态过程中,由于工作点的改变,变流器将沿某一特定路径从1点过渡到2点,图3中示例了3条不同路径 I、II、III。过渡路径清晰地说明了

变流器输出电流随时间的变化过程,体现了变流器控制电路对其输出响应的动态调节特性。在控制策略已定的情况下,不同的控制参数将导致变流器工作点过渡路径的不同,从而决定了其故障暂态响应过程。

变流器的故障响应特性由稳态响应和暂态响应叠加构成。稳态响应仅取决于变流器静态特性,不随时间发生变化;暂态响应取决于变流器控制策略和控制参数,决定了变流器输出随时间动态变化过程。静态工作特性是变流器自身所固有的特性,易于计算分析。因此,分析含变流器电力元件故障响应特性,关键在于探究其暂态响应的求解计算方法。

2.2 变流器故障特性定量分析

继电保护整定计算的核心问题在于短路电流中工频交流分量的计算。本节基于变流器基本功能和控制策略的分析,从理论上得到含变流器电力元件的简化数学模型,进一步通过合理近似和数学推导,推导出交流侧电压跌落后的暂态过程中变流器输出短路电流工频分量的解析式。含变流器电力系统的简化模型如图4所示。

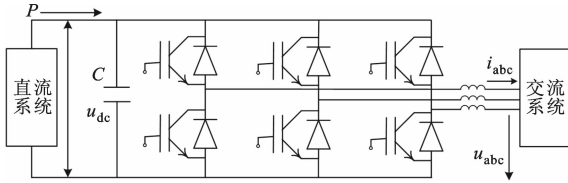


图4 含变流器系统简化模型图

在 dq 坐标系下,采用交流侧电压定向以实现变流器输出功率解耦控制。假设变流器的交流侧以单位功率因数并入交流系统,此时无功电流 $i_q=0$,因此只需分析有功电流 i_d 的故障暂态响应。进一步,假设有功电流在故障暂态过程中始终没有达到输出上限,即撬棒电路未投入。

由变流器两侧的有功功率守恒可得

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

式中: P 为直流侧输入功率; u_d 为 dq 坐标下 u_{abc} 的 d 轴分量; i_d 为 dq 坐标下 i_{abc} 的 d 轴分量; r 为变流器开关损耗的等效电阻。

对于变流器控制器,由上述分析可知,直流电压外环对有功电流调节起主要作用,同时保持直流侧电压稳定,可以得到控制器控制方程

$$i_d = k_p(u_{dc} - u_{dc}^*) + k_i \int (u_{dc} - u_{dc}^*) dt \quad (4)$$

式中: k_p 和 k_i 为PI调节器比例、积分增益; u_{dc}^* 为直

流母线电压指令。

联立式(2)~式(4),可以得到 dq 坐标系下含变流器电力元件的简化数学模型

$$\left. \begin{aligned} P - \frac{3}{2}u_d i_d - r i_d &= u_{dc} C \frac{du_{dc}}{dt} \\ i_d &= k_p(u_{dc} - u_{dc}^*) + k_i \int (u_{dc} - u_{dc}^*) dt \\ i_q &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,该模型将变流器等效为交直流间电能变换元件,兼顾变流器控制策略,保留了变流器的基本功能与控制特性,完整地反映了含变流器电力元件的故障动态响应过程。简化模型突出了控制电路对其故障暂态特性的关键作用,同时式(5)是在 dq 坐标系下得到的,反映了变流器直流侧母线电压以及输出电流工频分量的暂态响应过程。

式(5)推导出了基于变流器功能与控制策略的简化模型数学表达式,由于 u_d 为时变量,该表达式为一组二阶非线性时变微分方程组,利用现有数学方法无法从理论上推导出其解析解。为得到含变流器电力元件输出故障响应的解析表达,计算出继电保护所需的工频短路电流,需要对上述表达式进行数学变换与合理的近似处理。

对式(5)中 i_d 两端同时取微分,并对方程组进行变形,可得

$$\begin{aligned} \frac{du_{dc}^2}{dt} &= \frac{2}{C}P - \frac{1}{C}(3u_d + 2r)i_d \\ \frac{di_d}{dt} &= \frac{k_p}{2u_{dc}} \frac{du_{dc}^2}{dt} + \frac{k_i}{u_{dc} + u_{dc}^*} (u_{dc}^2 - u_{dc}^{*2}) \end{aligned} \quad (6)$$

当发生故障后,交流侧电压一般跌落到定值, u_d 近似为定值 E_d ,且保持不变。令 $u = u_{dc}^2$, $k'_p = \frac{k_p}{2u_{dc}}$,

$k'_i = \frac{k_i}{u_{dc} + u_{dc}^*}$, $u^* = u_{dc}^{*2}$,并将式(6)中两个微分方程进行整理,可得变流器数学方程的矩阵形式

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C}(3E_d + 2r) \\ k'_i & -\frac{k'_p}{C}(3E_d + 2r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{2P}{C} \\ \frac{2k'_p}{C}P - k'_i u^* \end{bmatrix} \quad (7)$$

由于变流器采用恒功率控制策略,故障暂态时间比较短,因此 P 可假定不变,同时 C 、 r 均为定参数,电压跌落 E_d 为已知定值,但 u_{dc} 为时变量,导致 k'_p 、 k'_i 仍为时变参数。进一步考虑到直流侧母线电

压一般波动较小,近似认为 $u_{dc} \approx u_{dc}^*$, 则

$$k_p' = \frac{k_p}{2u_{dc}}; \quad k_i' = \frac{k_i}{2u_{dc}} \tag{8}$$

此时式(7)中所有参量均为定值,方程转化为关于变流器输出变量 u 和 i_d 的常微分方程组,可以作为含变流器电力元件的近似状态方程。利用式(7)可以对变流器的输出特性进行理论分析,进一步对式(7)进行求解,即可求得变流器直流侧母线电压以及输出电流工频分量在 dq 坐标系下的理论解析表达式。

$$\text{令 } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{C}(3E_d + 2r) \\ k_i' & -\frac{k_p'}{C}(3E_d + 2r) \end{bmatrix}, \text{ 由 } |\lambda \mathbf{I} - \mathbf{A}| = 0,$$

可得

$$\lambda^2 + \frac{k_p'}{C}(3E_d + 2r)\lambda + \frac{k_i'}{C}(3E_d + 2r) = 0 \tag{9}$$

求解式(9),可以得到式(7)的特征值 λ_1, λ_2 , 以及对应的特征向量 $\mathbf{P}_1, \mathbf{P}_2$, 进一步可以得到变流器直流侧母线电压相关变量 $u(t)$ 以及输出电流 $i_d(t)$ 的解析表达式为

$$\begin{bmatrix} u(t) \\ i_d(t) \end{bmatrix} = C_1 \mathbf{p}_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 \mathbf{p}_2 e^{\lambda_2 t} + \begin{bmatrix} u^* \\ \frac{2P}{3E_d + 2r} \end{bmatrix} \tag{10}$$

式中: C_1, C_2 为待定系数,将 $u(t)$ 和 $i_d(t)$ 的初始值代入式(10),即可得到直流侧母线电压以及 dq 坐标系下输出电流的故障暂态解析表达式。此时,对电流进行反 Park 变换,即可得到三相静止坐标下变流器输出工频电流故障过程中的解析表达式。

由式(10)可以看出,变流器故障响应由两部分组成:一部分不随时间发生改变,反映了变流器静态工作点;另一部分随时间发生变化,反映了变流器故障暂态工作点过渡路径,体现出变流器动态特性。由式(9)可以看出,决定故障暂态衰减特性的特征值 λ_1, λ_2 与控制参数 k_p, k_i 具有一定关联,当改变控制参数时,变流器暂态响应将发生改变,说明了控制电路对变流器暂态响应具有至关重要的作用。该结果与定性分析的结果一致,说明了本文关于含变流器电力元件故障特性分析方法的正确性。

3 仿真验证

新能源发电是目前研究的热门课题,其中直驱风机是一种广泛应用的含变流器电力元件。本文在 PSCAD 仿真软件上搭建详细的直驱风机模型,采用

典型的恒功率控制策略,保持输入变流器功率不变,网侧变流器实现单位功率因数并网,即 $i_q = 0$, 以电流流入变流器为正方向。

当故障发生后,由于直流环节的隔离作用,直驱风机暂态响应主要取决于网侧变流器,因此重点分析直驱风机网侧变流器故障过程的输出特性。网侧变流器的主要参数如表 1 所示。

表 1 网侧变流器主要参数

参数	数值
输入变流器功率 P/MW	0.677
直流侧稳压电容 C/F	0.01
变流器等效电阻 r/Ω	0.075
直流母线电压给定 u_{dc}^*/kV	1.5

仿真系统在 1.5 s 时发生故障,网侧电压由 0.69 kV 跌落到 0.33 kV。

(1)直流电压外环比例增益参数 $k_p = 2$, 积分增益参数 $k_i = 100$ 。

将参量代入变流器状态方程式(7)中,可以得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -114 \\ 33.3 & -76 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 135.4 \\ 15.267 \end{bmatrix}$$
$$i_d(0) = -0.7; \quad u(0) = 2.25$$

求解该线性常微分方程组,可以得到直流侧母线电压 u_{dc} 以及 dq 坐标下输出电流的理论表达式为

$$u_{dc}(t) = (0.002\,37e^{-38.0t} \cos(48.6t) + 1.07e^{-38.0t} \sin(48.6t) + 2.25)^{1/2}$$
$$i_d(t) = -(0.359e^{-38.0t} \sin(48.6t) - 0.457e^{-38.0t} \cos(48.6t) + 1.19)$$
$$i_q(t) = 0$$

将 dq 坐标下电流进行反 Park 变换,即可得到三相静止坐标下输出电流工频分量,并将其与详细建模仿真结果对比,结果如图 5 所示。

从图 5a 中可以看出,直流侧母线电压理论计算与仿真结果在正常状态、故障暂态以及故障稳态过程中波形基本上吻合,说明了理论计算直流侧母线电压故障响应解析表达式的正确性。图 5b 和图 5c 表示故障过程中变流器输出电流动态响应过程,由图可以看出,在故障暂态以及故障稳态的整个响应过程中,理论计算结果均能够很好地吻合详细模型仿真结果,证明了理论计算变流器输出工频电流暂态响应解析表达式的正确性。

图 5d 以 a 相为例,将理论计算变流器输出工频电流与仿真电流中的工频分量进行对比,从图中可

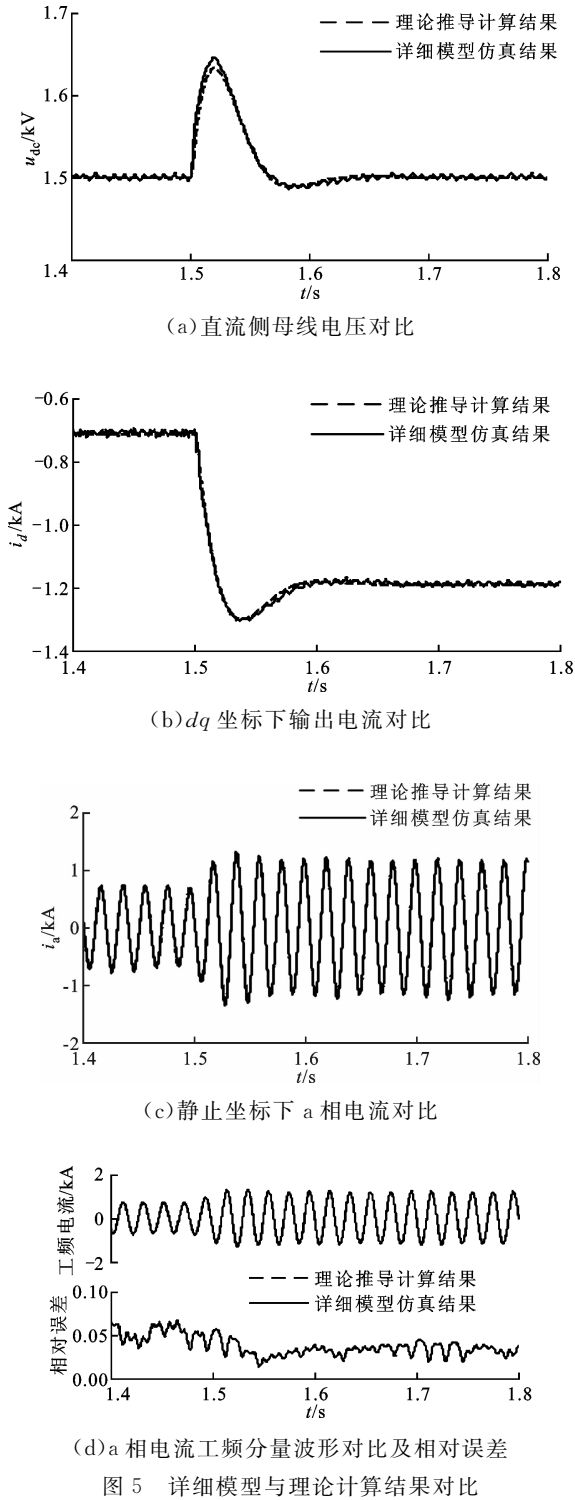


图5 详细模型与理论计算结果对比

以看出理论计算结果与仿真结果基本重合。由于短路电流计算方法在推导过程中存在近似,同时详细模型仿真结果中谐波对工频分量提取准确性有一定的影响,因此本文计算得到的理论工频短路电流在整个过程中相对于仿真结果存在一定的误差,但最大相对误差仅为 5.82%,说明了本文方法具有较高的精确度。

(2) 直流电压外环比例增益参数 $k_p = 1$, 积分增益参数 $k_i = 50$ 。

将参量代入变流器状态方程式(7)中,可以得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u \\ i_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -57 \\ 16.7 & -38 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ i_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 135.4 \\ 7.634 \end{bmatrix}$$

$$i_d(0) = -0.7; u(0) = 2.25$$

求解该线性常微分方程组,可以得到直流侧母线电压 u_{dc} 以及 dq 坐标下输出电流的理论表达式为

$$u_{dc}(t) = (-1.0 \times 10^{-5} e^{-19t} \cos(39.2t) + 1.42 e^{-19t} \sin(39.2t) + 2.25)^{1/2}$$

$$i_d(t) = -(0.236 e^{-19t} \sin(39.2t) - 0.488 e^{-19t} \cos(39.2t) + 1.19)$$

$$i_q(t) = 0$$

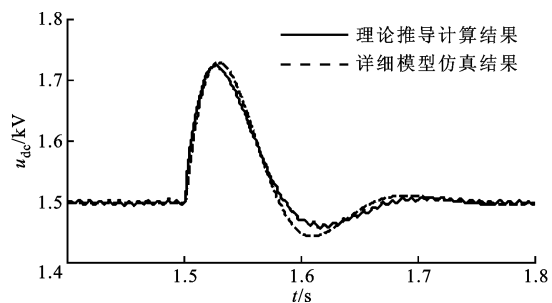
将 dq 坐标系下的电流进行反 Park 变换,即可得到三相静止坐标下输出电流的工频分量,将其与详细模型仿真结果进行对比,结果如图 6 所示。

将图 6 与图 5 进行比较可以看出,当仅有控制参数发生变化时,变流器故障稳态响应并未发生改变,但暂态响应路径不再相同,说明了控制电路对变流器故障暂态响应特性的决定性作用,这与理论分析结果一致。同时,图 6 中理论计算结果很好地吻合了详细仿真模型在正常状态、故障暂态以及故障稳态整个过程的结果,进一步验证了含变流器电力元件短路电流分析计算方法的正确性。图 6d 将理论计算工频电流波形与详细仿真模型输出电流工频分量进行对比,计及谐波对详细模型仿真结果工频量提取的影响以及短路电流解析表达式推导过程中存在的近似,短路电流理论计算结果存在着误差,但在整个过程中的最大相对误差仅为 6.94%,说明本文短路电流计算方法具有较高的精确度。

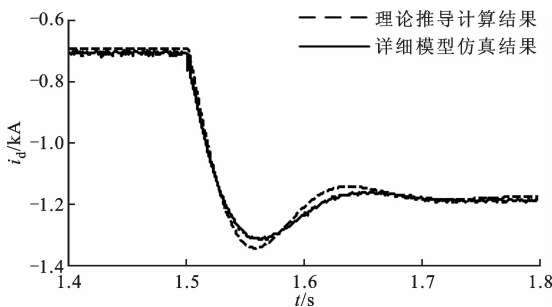
以上针对不同的变流器控制参数,理论计算结果在正常状态、故障暂态和故障稳态整个过程中均能够很好地吻合详细仿真模型,验证了本文提出的含变流器电力元件工频短路电流计算方法的正确性,说明了控制参数对变流器故障响应特性的决定性作用,并且可以看出本文提出的短路电流计算方法具有较高的精确度。

4 结 论

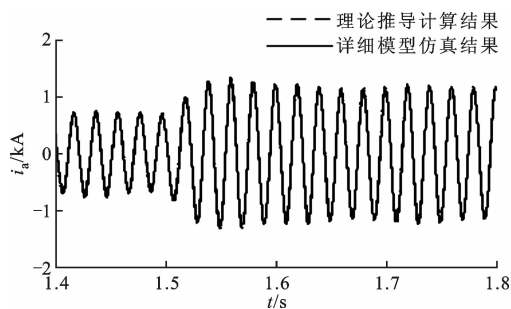
本文针对含变流器电力元件,提出了一种适用于继电保护分析的短路电流分析计算方法,推导出变流器直流侧母线电压以及输出短路电流工频分量在故障期间动态响应的近似数学解析式。通过理论分析和仿真验证可以得出以下结论。



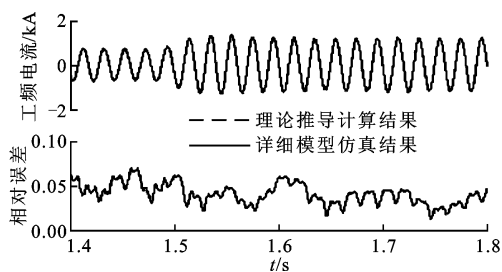
(a) 直流侧母线电压对比



(b) dq 坐标下输出电流对比



(c) 静止坐标下 a 相电流对比



(d) a 相电流工频分量波形对比及相对误差

图6 详细模型与理论计算结果对比图

(1) 结构复杂的变流器可以等效为一个含有控制、实现交直流之间电能变换的受控元件。

(2) 变流器控制策略以及控制参数决定了含变流器电力元件故障暂态响应特性。

(3) 从理论上对变流器数学模型进行简化, 分析计算出含变流器电力元件在故障过程中工频短路电流的近似解析表达式。

(4) 研究结果能够应用于现有继电保护分析计

算, 为含变流器电力系统继电保护整定计算以及新的保护原理的提出奠定了基础。

参考文献:

- [1] 徐政, 卢强. 电力电子技术在电力系统中的应用 [J]. 电工技术学报, 2004, 19(8): 23-27.
XU Zheng, LU Qiang. Application of power electronic technology in power systems [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(8): 23-27.
- [2] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 3-7.
- [3] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 电力电子装置典型模型的适应性分析 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 63-68.
WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Adaptability analysis of typical power electronic device models [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 63-68.
- [4] 王成山, 彭克, 孙绪江. 分布式发电系统电力电子控制器通用建模方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36(18): 122-127.
WANG Chengshan, PENG Ke, SUN Xujiang. Universal modeling method of power electronics controller for distributed generation system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(18): 122-127.
- [5] 梁海峰, 李庚银, 周明, 等. 电压源换流器高压直流输电的动态等效电路及其特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 53-60.
LIANG Haifeng, LI GENGyin, ZHOU Ming, et al. Dynamic equivalent circuit of VSC-HVDC and its performance analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 53-60.
- [6] 王成山, 李琰, 彭克. 分布式电源并网逆变器典型控制方法综述 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(2): 12-20.
WANG Chengshan, LI Yan, PENG Ke. Over view of typical control method for grid-connected inverters of distributed generation [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2012, 24(2): 12-20.
- [7] 杨恩星, 仇志凌, 陈国柱. 基于载波移相并联的直驱风力发电并网变流器控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(21): 8-13.
YANG Enxing, QIU Zhiling, CHEN Guozhu. Control strategy for direct-drive wind generation grid side converter based on carrier phase shifting parallel [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 8-13.
- [8] 李琼林, 余晓鹏, 张晓东, 等. 三相四线制变流器非典型谐波产生机理探析 [J]. 高电压技术, 2010, 36

- (4): 1026-1031.
- LI Qionglin, YU Xiaopeng, ZHANG Xiaodong, et al. Non-characteristic harmonic analysis of converter with three-phase four-wire connection [J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(4): 1026-1031.
- [9] 姚骏, 夏先锋, 陈西寅, 等. 风电并网用全功率变流器谐波电流抑制研究 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 17-25.
- YAO Jun, XIA Xianfeng, CHEN Xiyin, et al. Harmonic currents suppression for full size power grid-connection converter used for wind power generation [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 17-25.
- [10] 孙景钊, 李永丽, 李盛伟, 等. 含逆变型分布式电源配电网自适应电流速断保护 [J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 71-76.
- SUN Jingliao, LI Yongli, LI Shengwei, et al. Study on adaptive current instantaneous trip protection scheme for distribution network with inverter interfaced DG [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(14): 71-76.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] ABEDINI A, NASIRI A. PMSG wind turbine performance analysis during short circuit faults [C] // IEEE Canada Electrical Power Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 160-165.
- [14] CHENG Shukang, LIU Weiliang. Analysis of sudden short circuit current for PMSG [C] // IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 3-5.
- [15] 毕天姝, 刘素梅, 薛安成, 等. 逆变型新能源电源故障暂态特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(13): 165-171.
- BI Tianshu, LIU Sumei, XUE Ancheng, et al. Fault characteristics of inverter-interfaced renewable energy sources [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(13): 165-171.
- [16] 高峰, 周孝信, 朱宁辉, 等. 直驱式风电机组机电暂态建模及仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 35(11): 29-34.
- GAO Feng, ZHOU Xiaoxin, ZHU Ninghui, et al. Electromechanical transient modeling and simulation of direct-driven wind turbine system with permanent magnet synchronous generator [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 35(11): 29-34.
- [17] 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 Jinxin, XIONG Xiaofu, ZHANG Hanyi. Characteristics of DFIG-based wind generation under grid short circuit [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(22): 17-25.
- [18] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012: 132-133.

[本刊相关文献链接]

- 滕予非, 宁联辉, 王锡凡. 分频输电系统交交变频器桥臂短路故障研究. 2014, 48(2): 56-61. [doi:10.7652/xjtuxb201402010]
- 宋国兵, 靳幸福, 李德坤, 等. 识别模型参数的电压源换流器型直流输电线路纵联保护. 2013, 47(8): 110-114. [doi:10.7652/xjtuxb201308019]
- 梁振锋, 索南加乐, 康小宁, 等. 利用最小二乘拟合算法的三相重合闸永久性故障判别. 2013, 47(6): 85-89. [doi:10.7652/xjtuxb201306015]
- 程临燕, 张保会, 李光辉, 等. 采用有向电气介数的脆弱线路选取. 2011, 45(6): 91-96. [doi:10.7652/xjtuxb201106017]
- 褚建峰, 王曙鸿, 邱捷, 等. 新型桥式高温超导故障限流器的设计. 2010, 44(10): 99-104. [doi:10.7652/xjtuxb201010019]
- 索南加乐, 夏经德, 焦在滨, 等. 故障全量的分相复合阻抗输电线路纵联保护原理. 2010, 44(2): 92-97. [doi:10.7652/xjtuxb201002019]
- 康小宁, 张鹏, 索南加乐, 等. 基于模型识别的并联电容器保护. 2008, 42(12): 1506-1509. [doi:10.7652/xjtuxb200812015]
- 索南加乐, 刘凯, 刘世明, 等. 一种新的高压线路振荡选相元件. 2007, 41(8): 949-953. [doi:10.7652/xjtuxb200708016]

(编辑 杜秀杰)