

DOI: 10.7667/PSPC160489

## 基于电流有效值的静止变频器本体差动保护新方法

郑涛<sup>1</sup>, 于硕<sup>1</sup>, 姜雪<sup>2</sup>, 郭艳凤<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 辽宁 沈阳 110015; 3. 国网北京市电力公司, 北京 100031)

**摘要:** 静止变频器(SFC)是大型抽水蓄能机组水泵工况下启动的重要设备。鉴于目前 SFC 本体差动保护的不足, 提出了一种新的保护方法——幅值差动保护。SFC 的网桥侧电流为工频电流, 机桥侧电流为变频电流, 难以直接进行常规差动电流计算。基于静止变频器的基本原理, 尽管电流经过 SFC 后频率发生变化, 但其有效值是不变的, 故可利用机、网两侧电流幅值构成差动保护方案。首先通过判断过零点的方式确定变频电流的周期, 然后确定电流的有效值, 最后提出幅值差动保护方法。在 Matlab/Simulink 中搭建了抽水蓄能机组静止变频启动模型。仿真结果验证了幅值差动保护具有良好的选择性和速动性。

**关键词:** 抽水蓄能; SFC; 幅值差动保护; 过零点; 有效值; 仿真

### A novel SFC differential protection method based on current effective value

ZHENG Tao<sup>1</sup>, YU Shuo<sup>1</sup>, JIANG Xue<sup>2</sup>, GUO Yanfeng<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. Economic Research Institute of State Grid Liaoning Electric Power Supply Co. Ltd., Shenyang 110015, China;  
3. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China)

**Abstract:** Static Frequency Converter (SFC) is an important equipment of large pumped storage unit starting under pump operating condition. Given the lack of current SFC differential protection, this paper proposes a new protection method, namely amplitude differential protection. As the SFC current at grid side is power-frequency and the current at generator side is variable-frequency, it is difficult to calculate the conventional differential current directly. Based on the basic principle of SFC, the current frequency changes after current flows through SFC, but the effective value is unchanged. Therefore, SFC current RMS (Root Mean Square) at grid side and generator side can be utilized to constitute differential protection scheme. Firstly, the period of variable-frequency current is obtained by using the zero crossing. Then the effective value of variable-frequency current is determined. Finally, an amplitude differential protection method is proposed. In addition, SFC starting model of pumped storage unit is built in Matlab/Simulink and the good quickness and selectivity of amplitude differential protection is verified by the simulation results.

**Key words:** pumped storage; SFC; amplitude differential protection; zero crossing; RMS; simulation

## 0 引言

随着我国经济的快速发展和人民生活水平的日益提高, 电力负荷增长迅猛, 峰谷差不断加大, 用户对电力供应的安全和质量的期望值越来越高, 对电网的调峰能力提出了新的挑战<sup>[1-2]</sup>。抽水蓄能电站对电网负荷的峰谷调节、事故备用和所产生的经济利益已得到越来越多的重视。抽水蓄能电站将成为我国电力系统有效的、不可或缺的调节工具<sup>[3-5]</sup>。

静止变频器(Static Frequency Converter, SFC)变

频启动具有无级调速、启动平稳、反应速度快、调整方便、维护工作量小、可靠性高等特点和很强的自诊断功能, 以及设备安装布置灵活, 工作效率高, 机组启动过程中对电网冲击小等优点, 所以广泛应用于大型抽水蓄能机组水泵工况下的启动<sup>[6]</sup>。我国大型的抽水蓄能电站如广州抽水蓄能电站、天荒坪抽水蓄能电站和浙江桐柏抽水蓄能电站等均采用 SFC 变频启动作为主要启动方式, 并辅以背靠背启动方式作为备用<sup>[7]</sup>。

目前 SFC 均为进口设备, SFC 系统保护也由相

应的国外厂家提供。然而对于 SFC 本体保护仅法国 ALSTOM 公司提供配套的差动保护功能,其他公司的 SFC 设备均未配备此差动保护功能<sup>[8]</sup>。SFC 设备存在缺少快速主保护、后备保护动作时间较慢等问题。另外,大型抽水蓄能电站的重要设备(发电-电动机、主变压器等)均已配置差动保护,仅 SFC 设备因技术难度高未配备差动保护。因此,对 SFC 本体保护进行深入研究具有重要意义。

由于对 SFC 本体配置差动保护技术难度高,国内在这一方面的研究资料较少。文献[9]提到某一种算法,将 SFC 的机桥侧变频电流转换成工频校正电流,再与网桥侧电流构成差动电流和制动电流,形成差动保护,但其具体实现方案并不明确。

综上,SFC 本体保护研究资料较少,而且相关资料并没有给出明确的实现方案,因此 SFC 本体保护应引起足够重视。为解决 SFC 配置常规差动保护困难的问题,本文提出了一种利用电流有效值构成 SFC 本体差动保护的新方法。

### 1 SFC 本体配置差动保护的难点

静止变频系统主要分为交直交电流型、交直交电压型、交交电流型、交交电压型 4 种类型。其中,每一种类型还可分为 6 脉波和 12 脉波。本文主要研究的是 6 脉波-交直交电流型静止变频系统,其拓扑结构如图 1 所示。SFC 系统主要包括输入变压器、整流侧晶闸管、平波电抗器、续流晶闸管、逆变侧晶闸管、输出变压器、转子位置检测器和控制系统等<sup>[10]</sup>。

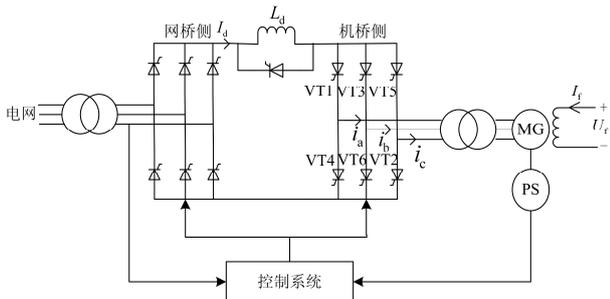


图 1 SFC 系统拓扑结构图

Fig. 1 Topological structure of SFC system

SFC 系统的基本工作原理为:网桥侧接至电网(电网频率为 50 Hz),利用电机转子的空间位置,经整流逆变产生变频三相交流电流通入定子绕组中,产生的定子磁场与转子磁场相互作用形成电磁转矩,将电机逐渐拖动至额定转速。因此,机桥侧电气量的频率由 0 逐渐升至 50 Hz。

静止变频器的网桥侧电流为工频电流,而机桥侧电流为 0 到 50 Hz 变化的电流,如何实现两侧频率不一致情况下的差动保护,是 SFC 本体配置差动

保护的难点<sup>[9]</sup>。

### 2 幅值差动保护的基本原理及实现

常规差动保护是利用工频相量构成的,而 SFC 由于机、网两侧电流频率不同,配置常规差动保护比较困难。

根据静止变频器的基本原理,电网的工频电流经过 SFC 后,尽管频率发生变化,但其有效值保持不变。因此,本文提出直接利用机、网两侧电流的有效值构成 SFC 本体差动保护,即幅值差动保护。

由图 1 可知,网桥侧为静止变频器的整流侧,机桥侧为逆变侧。根据电流型逆变电路的基本原理,由于直流回路的平波电抗器  $L_d$  较大,认为直流电流  $I_d$  在一个逆变周期内恒定不变,逆变器按  $120^\circ$  导电方式工作,如果忽略晶闸管的换流过程,机桥侧三相输出电流都将是峰值为  $I_d$ 、正负半周宽度为  $120^\circ$ 、前沿相差  $180^\circ$  的矩形波,如图 2 所示(以一相电流为例)。

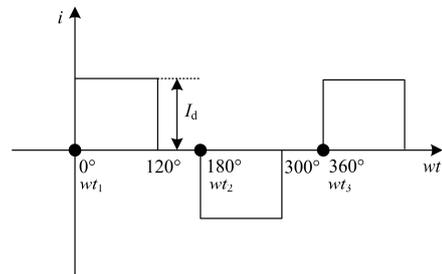


图 2 机桥侧输出电流波形

Fig. 2 Output current waveform at generator side

周期电流的有效值等于其瞬时值的平方在一个周期内积分的平均值的算术平方根,其表达式如式(1)。

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} \quad (1)$$

式中:  $I$  为周期电流有效值;  $i$  为电流瞬时值;  $T$  为电流的周期。

根据式(1),计算机桥侧输出电流的有效值,则有

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \left[ (I_d)^2 \times \frac{2\pi}{3} + (-I_d)^2 \times \frac{2\pi}{3} \right]} = 0.816I_d \quad (2)$$

由式(2)可知,机组正常启动时,机桥侧输出电流的有效值为  $0.816I_d$ ,与输出电流的频率无关。

同理,根据整流电路的基本原理,认为带阻感负载,由于平波电抗器  $L_d$  较大,在一个周期内,网桥侧的输入电流也为峰值为  $I_d$ 、正负半周宽度为  $120^\circ$ 、前沿相差  $180^\circ$  的矩形波,计算得到网桥侧输

入电流的有效值也为  $0.816I_d$ 。

可以发现, 尽管机、网两侧电流的频率不同, 但是两侧电流的有效值是相同的。因此, 可以利用两侧电流有效值构成差动保护。

同时, 由式(1)可知, 计算电流有效值的关键在于得到电流的周期。SFC 网桥侧电流周期恒为  $0.02\text{ s}$ , 而机桥侧电流周期是逐渐变化的。本文通过判断过零点, 计算机桥侧电流周期。如图 2 所示, 每 3 个过零点(过零点是指具有上升沿特性的零点)可以确定为一个周期, 则有

$$T = t_{k+2} - t_k \quad (k=1, 2, 3 \dots) \quad (3)$$

其中,  $t_m$  为过零点时刻,  $m=1, 2, 3 \dots$ 。

周期确定后, 计算一个周期内瞬时电流平方的积分值, 最后得到电流的有效值。为便于后续幅值差的计算, 在每个过零点上提取一个周期的电流有效值, 每隔半个周期提取一次有效值, 结果如图 3 所示。

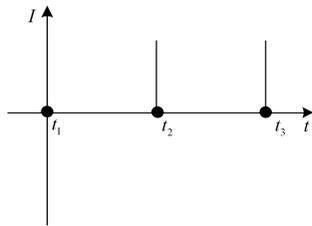


图 3 机桥侧输出电流有效值

Fig. 3 Output current RMS at generator side

幅值差动保护可如式(4)整定。

$$I_d = |I_m - I_n| > K_{rel} I_{unb} \quad (4)$$

式中:  $I_d$  为幅值差动保护的動作电流;  $I_{unb}$  为区外故障下的最大不平衡电流;  $K_{rel}$  为可靠性系数, 一般取为 1.5;  $I_n$ ,  $I_m$  分别为网桥侧、机桥侧电流有效值。

### 3 SFC 系统正常启动仿真结果

根据 6 脉波-交直交电流型静止变频系统的拓扑结构和基本工作原理, 在 Matlab/Simulink 软件中搭建抽水蓄能机组静止变频系统的模型。

静止变频系统根据关闭逆变桥侧晶闸管的方式不同, 可将启动过程分为两个阶段, 断续换流阶段和自然换流阶段。断续换流是指电机刚启动时, 机组转速较低(一般小于约 10%的额定转速), 定子绕组感应的反电动势较小, 晶闸管无法利用感应电压关断, 因此采用断续换流的方式实现换相。自然换流是指当机组转速高于 10%的额定转速时, 定子绕组感应的反电动势可以顺利关断晶闸管, 从而完成

换相。静止变频系统正常启动时机桥侧 A 相电流仿真结果如图 4 所示, 虚线左侧为断续换流阶段, 虚线右侧为自然换流阶段。

SFC 变频启动时间约为  $5 \sim 10\text{ min}$ <sup>[11]</sup>。由图 4 可知, 断续换流阶段不到  $1.5\text{ s}$ , 占正常启动时间的比例较小。而且, 文献[9]也提到, 在断续换流阶段, 机桥侧频率小于  $5\text{ Hz}$ , CT 不能正确传变, SFC 本体差动保护将出现较大的差流, 为防止差动保护误动, 应在此过程中闭锁该保护。因此, 本文以自然换流阶段作为研究阶段。

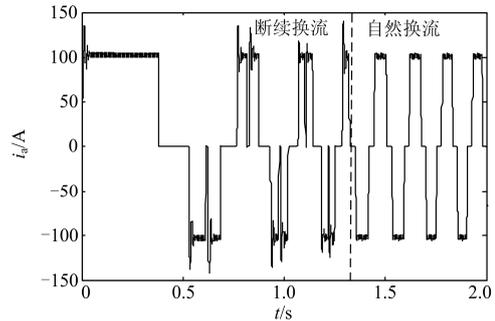


图 4 静止变频系统正常启动时机桥侧 A 相电流

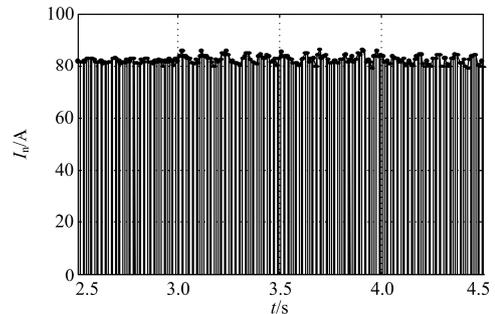
Fig. 4 Phase A current at generator side under normal SFC starting

利用上文提到的计算有效值的方法可得网桥侧、机桥侧 A 相电流有效值, 分别如图 5(a)、(b)所示。因为三相电流对称, 所以可以仅计算一相电流有效值(以 A 相电流为例)。两侧电流幅值差利用式(5)进行计算, 结果如图 5(c)所示。

$$\Delta I = |I_m - I_n| / I_{mz} \quad (5)$$

式中:  $\Delta I$  为机、网两侧 A 相电流幅值差;  $I_m$  为机桥侧 A 相电流幅值;  $I_n$  为网桥侧 A 相电流幅值;  $I_{mz}$  为正常启动时机桥侧 A 相电流幅值。

由图 5(a)、(b)、(c)可知, 静止变频系统正常启动时, 机桥侧和网桥侧 A 相电流有效值都在  $80\text{ A}$  左右波动, 两侧电流幅值差小于 10%的机桥侧电流幅值。因此可认为两侧电流的有效值基本一致。



(a) 正常启动时网桥侧 A 相电流幅值

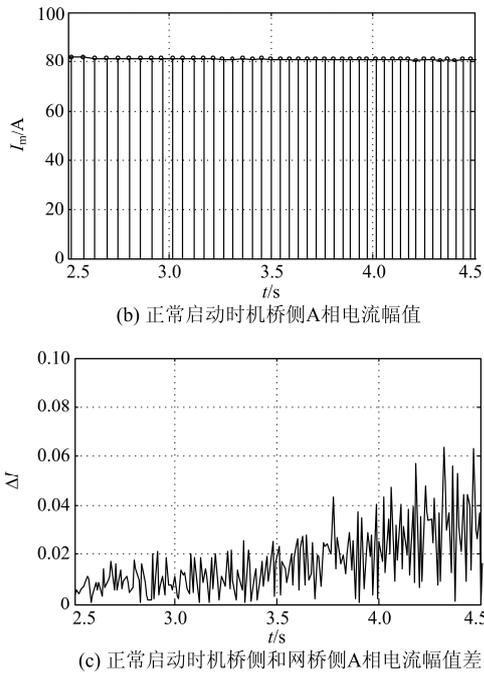


图 5 正常启动时网桥侧、机桥侧 A 相电流幅值及幅值差  
Fig. 5 Phase A current amplitudes at grid side and generator side and amplitude difference under normal starting

## 4 SFC 系统故障仿真结果

### 4.1 静止变频器故障类型

静止变频系统的每个桥臂都可能发生不同类型的故障，根据故障发生位置可分为<sup>[12]</sup>：

- 1) SFC 网桥侧输入线路故障。如图 6 中 F1 所示。
- 2) SFC 中逆变桥(或整流桥)的桥臂发生短路或断路的故障，如图 6 中 F2 所示。
- 3) SFC 机桥侧输出线路故障。如图 6 中 F3 所示。

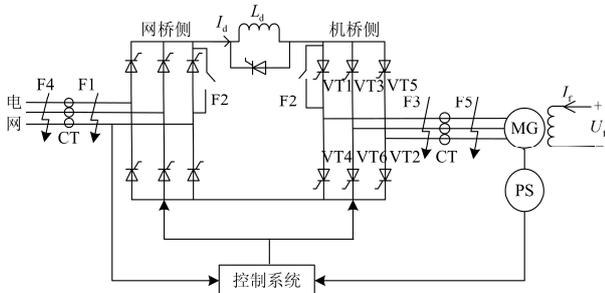


图 6 静止变频器的故障类型  
Fig. 6 SFC fault types

### 4.2 静止变频器发生不同类型故障的仿真结果

- 1) 网桥侧发生区内故障仿真结果  
网桥侧输入线路在 3 s 时发生区内三相短路接

地故障(图 6 中 F1 所示)，故障持续 1 s。网桥侧和机桥侧 A 相电流分别如图 7(a)、(b)所示。

利用式(5)计算机、网两侧 A 相电流幅值差，如图 7(c)所示。

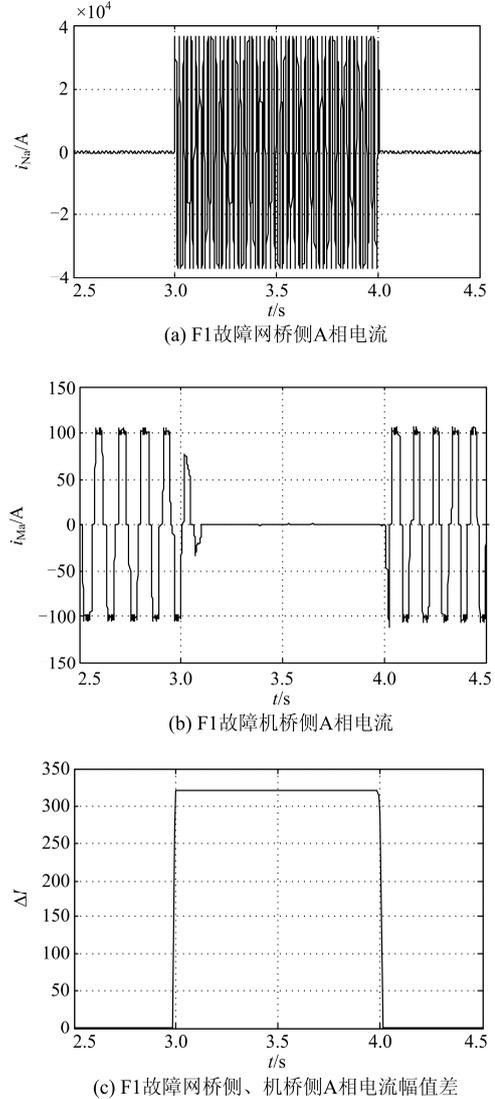


图 7 F1 故障网桥侧、机桥侧 A 相电流幅值及幅值差  
Fig. 7 Phase A current amplitudes at grid side and generator side and amplitude difference under F1 fault

由图 7(a)、(b)可知，当网桥侧发生区内三相短路接地故障时，故障期间，由于半导体器件的单向导电性，电机并不向故障点供给短路电流，只有电网侧提供短路电流，约为正常启动电流的 300 倍。由图 7(c)可知，机、网两侧电流幅值差约为正常启动时机桥侧电流幅值的 300 倍。

- 2) 网桥侧发生区外故障仿真结果  
网桥侧输入线路在 3 s 时发生区外三相短路接

地故障(图 6 中 F4 所示), 故障持续 1 s。网桥侧和机桥侧 A 相电流分别如图 8(a)、(b)所示。

利用式(5)计算机、网两侧 A 相电流幅值差, 如图 8(c)所示。

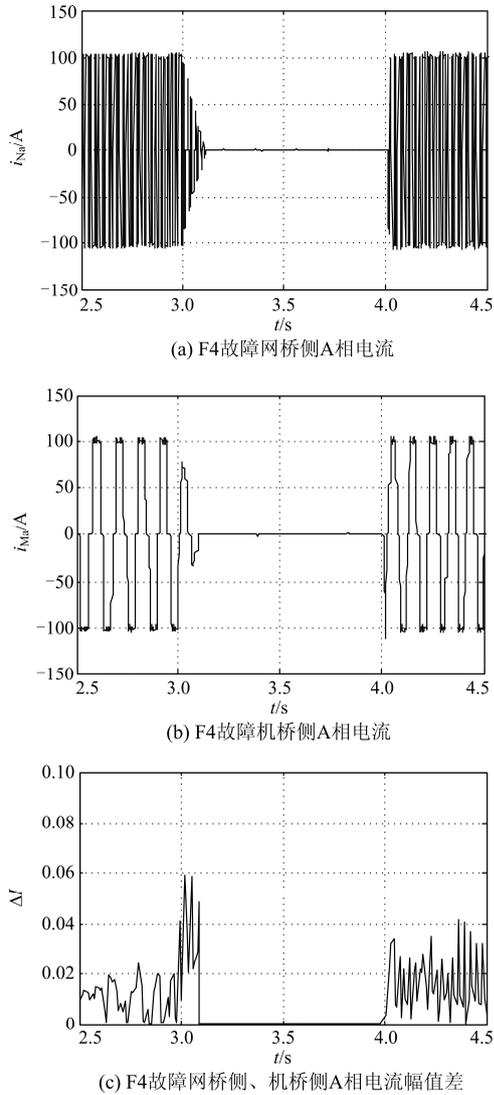


图 8 F4 故障网桥侧、机桥侧 A 相电流幅值及幅值差  
Fig. 8 Phase A current amplitudes at grid side and generator side and amplitude difference under F4 fault

由图 8(c)可知, 当网桥侧发生区外三相短路接地故障时, 故障期间的大部分时间内, 两侧电流幅值差为零, 最大也不超过正常启动时机桥侧电流幅值的 10%。

### 3) 机桥侧发生区内故障仿真结果

机桥侧输出线路在 3 s 时发生区内三相短路接地故障(图 6 中 F3 所示), 故障持续 1 s。网桥侧和机桥侧 A 相电流分别如图 9(a)、(b)所示。

利用式(5)计算机、网两侧 A 相电流幅值差, 如图 9(c)所示。

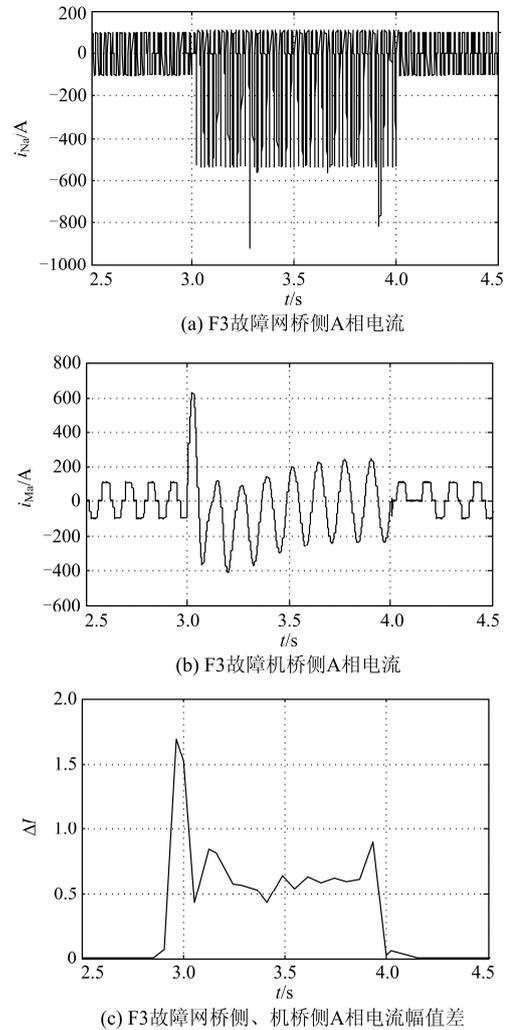


图 9 F3 故障网桥侧、机桥侧 A 相电流幅值及幅值差  
Fig. 9 Phase A current amplitudes at grid side and generator side and amplitude difference under F3 fault

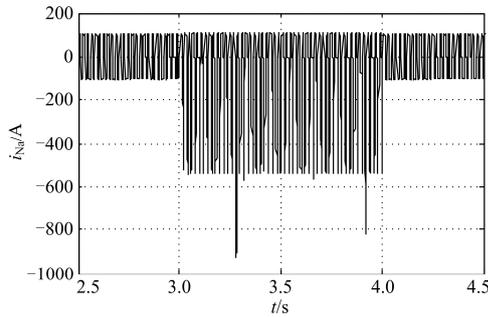
由图 9(c)可知, 当机桥侧发生区内三相短路接地故障, 故障期间, 两侧电流幅值差都大于正常启动时机桥侧电流幅值的 40%。

### 4) 机桥侧发生区外故障仿真结果

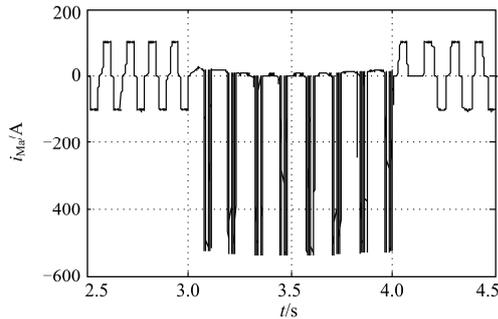
机桥侧输出线路在 3 s 时发生区外三相短路接地故障(图 6 中 F5 所示), 故障持续 1 s。网桥侧和机桥侧 A 相电流分别如图 10(a)、(b)所示。

利用式(5)计算机、网两侧 A 相电流幅值差, 如图 10(c)所示。

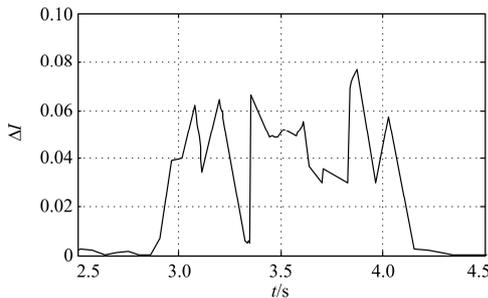
由图 10(c)可知, 当机桥侧发生区外三相短路接地故障, 故障期间, 两侧电流幅值差都小于正常启动时机桥侧电流幅值的 10%。



(a) F5故障网桥侧A相电流



(b) F5故障机桥侧A相电流

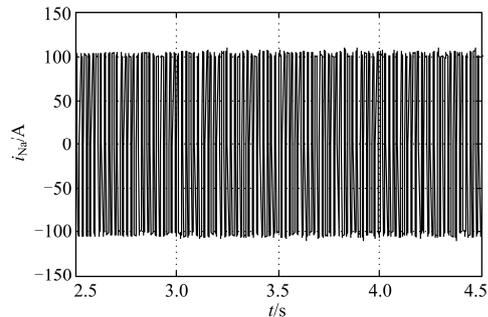


(c) F5故障网桥侧、机桥侧A相电流幅值差

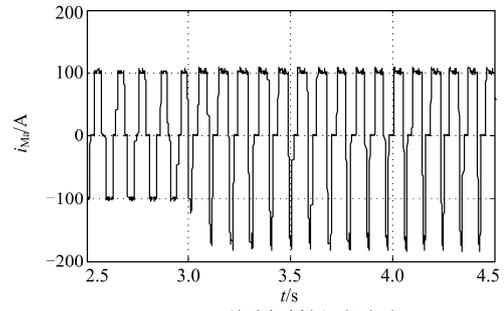
图 10 F5 故障网桥侧、机桥侧 A 相电流幅值及幅值差  
Fig. 10 Phase A current amplitudes at grid side and generator side and amplitude difference under F5 fault

5) 逆变桥桥臂发生短路故障仿真结果

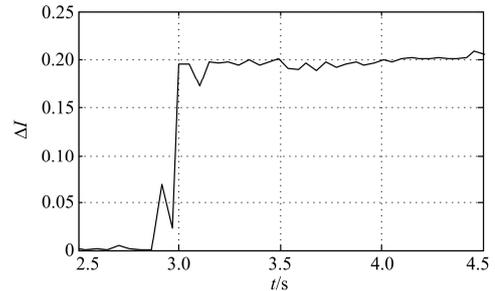
逆变桥 A 相上桥臂在 3 s 时发生短路故障(图 6 中右侧 F2 所示), 故障持续 1.5 s。网桥侧和机桥侧 A 相电流分别如图 11(a)、(b)所示。



(a) F2故障网桥侧A相电流



(b) F2故障机桥侧A相电流



(c) F2故障网桥侧、机桥侧A相电流幅值差

图 11 F2 故障网桥侧、机桥侧 A 相电流幅值及幅值差  
Fig. 11 Phase A current amplitudes at grid side and generator side and amplitude difference under F2 fault

利用式(5)计算机、网两侧 A 相电流幅值差, 如图 11(c)所示。

由图 11(c)可知, 当逆变桥 A 相上桥臂发生短路故障, 故障期间, 两侧 A 相电流幅值差都大于正常启动时机桥侧电流幅值的 15%。

本文对其他类型的故障也进行了仿真, 结果如表 1 所示。

表 1 其他类型故障下机、网两侧 A 相电流幅值差

Table 1 Phase A current amplitude difference between grid side and generator side under other types of fault

故障类型	两侧 A 相电流幅值差 $\Delta I$
网桥侧 A 相金属性接地短路	294
网桥侧 AB 两相短路	276
网桥侧 AB 两相短路金属性接地	305
机桥侧 A 相金属性接地短路	16.87
机桥侧 AB 两相短路	1.75
机桥侧 AB 两相短路金属性接地	4.27
逆变桥 A 相上桥臂断路	0.29

综上所述, SFC 系统在正常启动及在 SFC 本体保护范围外发生故障时, 机、网两侧电流幅值差较小, 一般不会超过正常启动时机桥侧电流幅值的 10%。而 SFC 本体保护范围内发生故障时, 机、网两侧电流幅值差较大, 最小也会超过正常启动时机桥侧电流幅值的 10%。机、网两侧电流幅值差在正

常启动、区外故障和区内故障有明显的差别,因此可以利用两侧电流幅值构成 SFC 本体差动保护。

根据式(4)和仿真结果,本模型中幅值差动保护的定值可取为

$$I_{\text{unb}} = 0.1I_{\text{mz}} \quad (6)$$

式中,  $I_{\text{mz}}$  为正常启动时机桥侧电流幅值。

## 5 结语

本文提出了幅值差动保护作为SFC 本体保护方案,成功地解决了SFC 因机、网两侧电流频率不同而配置常规差动保护困难的问题。根据静止变频器的基本原理,利用电流经过SFC 后频率改变,但幅值不变的特点,通过判断过零点的方式确定变频电流的周期,最后形成基于电流幅值的差动保护方案。在建立的抽水蓄能机组变频启动模型的基础上,通过仿真验证,证实幅值差动保护方案具有良好的选择性和速动性。

## 参考文献

- [1] 张顺,葛智平,郭涛,等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110.  
ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [2] 魏刚,范雪峰,张中丹,等. 风电和光伏发展对甘肃电网规划协调性的影响及对策建议[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(24): 135-141.  
WEI Gang, FAN Xuefeng, ZHANG Zhongdan, et al. Influence of wind power and photovoltaic's development on Gansu power grid planning coordination and suggestions[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(24): 135-141.
- [3] 王光,娄季献,陈俊,等. 大型抽水蓄能机组保护应用问题分析及对策[C] // 中国水力发电工程学会继电保护专业委员会 2012 年年会暨学术研讨会. 2012 年 12 月 1 日,重庆,2012: 55-58.
- [4] 王昕,井雨刚,王大鹏,等. 抽水蓄能机组继电保护配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 66-70.  
WANG Xin, JING Yugang, WANG Dapeng, et al. Research on configuration of protective relay for pumped storage power plant[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 66-70.
- [5] 张川,杨雷,牛童阳,等. 平抑风电出力波动储能技术比较及分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 149-154.

- ZHANG Chuan, YANG Lei, NIU Tongyang, et al. Comparison and analysis of energy storage technology to balance fluctuation of wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 149-154.
- [6] 吴贤忠,万静英. 静态变频装置在大型抽水蓄能机组中的应用[J]. 水电自动化与大坝监测, 2002, 26(4): 48-52.  
WU Xianzhong, WANG Jingying. Application of static frequency converter to large-sized pumped storage power units[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2002, 26(4): 48-52.
- [7] 周军. 抽水蓄能电站中 SFC 变频启动的若干特点[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(11): 99-101.  
ZHOU Jun. Variable-frequency starting of SFC in pumped storage power plant[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(11): 99-101.
- [8] 严伟,王光,陈俊,等. 大型抽水蓄能电站继电保护综述[C] // 抽水蓄能电站工程建设文集 2012. 2012 年 11 月 13 日,三亚,2012: 188-191.
- [9] 陈俊,司红建,周荣斌,等. 抽水蓄能机组 SFC 系统保护关键技术[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(8): 167-171.  
CHEN Jun, SI Hongjian, ZHOU Rongbin, et al. Key technologies of SFC system protection for pumped storage hydro unit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8): 167-171.
- [10] 姜树德. 张河湾电站机组抽水工况启动方式简介[C] // 抽水蓄能电站工程建设文集. 2008 年 10 月 20 日,丹东,2008: 1-5.
- [11] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 2 版. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [12] 陶大军. 发电电动机静止变频器起动强迫换流阶段若干问题研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.  
TAO Dajun. Research on several issues of generator/motor starting with SFC during forced commutation[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2013.

收稿日期: 2016-04-18; 修回日期: 2016-06-04

作者简介:

郑涛(1975-),男,博士,副教授,研究方向为电力系统继电保护;

于硕(1991-),男,通信作者,硕士研究生,研究方向为电力系统保护与安全控制; E-mail: cfyushuo2014@126.com

姜雪(1991-),女,硕士,研究方向为电力系统保护与安全控制。

(编辑 魏小丽)