

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191490

# 大型同步调相机的启机过程分析与启机保护实现

李志坚<sup>1,2,3</sup>, 吴崇昊<sup>1,2,3</sup>, 万洛飞<sup>1,2</sup>, 潘书燕<sup>1,2,3</sup>, 王华臻<sup>2</sup>, 李蔚<sup>1,2</sup>

(1. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106;  
3. 智能电网保护和运行控制国家重点实验室, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 近年来, 随着电网“强直弱交”的问题日渐突出, 同步调相机重新受到关注。300 Mvar 大型同步调相机已陆续在国内多个换流站投入应用。因调相机启机方式存在特殊性, 汽轮或水轮发电机组、抽水蓄能机组启机保护不完全适用于调相机, 有必要对调相机启机过程及其保护配置和算法进行研究。针对不同类型的机组采用对比方式, 分析了调相机的启机过程及其启机各阶段的三相短路电流特征。提出了更可靠、更快速的包含主变启机速断保护和励磁变启机差动保护在内的启机过程全区域保护。同时也提出了适用于调相机启机过程宽频率、宽电压变化的相角和幅值的修正方法。仿真结果表明, 幅值计算误差改善明显, 满足保护精度要求。

**关键词:** 同步调相机; 无功补偿; 静止变频器; 启机过程; 启机保护

## Analysis of start-up process and implementation of start-up protection of a large synchronous condenser

LI Zhijian<sup>1,2,3</sup>, WU Chonghao<sup>1,2,3</sup>, WAN Luofei<sup>1,2</sup>, PAN Shuyan<sup>1,2,3</sup>, WANG Huazhen<sup>2</sup>, LI Wei<sup>1,2</sup>

(1. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China;

2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institution), Nanjing 211106, China;

3. State Key Laboratory of Smart Grid Protection and Control, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Recently, more attention has been paid to the large synchronous condenser as the problem of “strong DC and weak AC” is becoming increasingly serious. The 300 Mvar large synchronous condenser has been put into service in many converter stations in China. Because of the particularity of the start-up mode of a synchronous condenser, the start-up protection of the turbo-generator, hydro-generator and pumped-storage-generator is not fully applicable to the synchronous condenser. It is necessary to study the start-up process and protection configuration and algorithms of the synchronous condenser. Its start-up stage and characteristics of three-phase fault current are analyzed in the start-up process by comparing different types of generator units. A more reliable and faster start-up protection is proposed, including main transformer start-up quick-break protection and excitation transformer start-up differential protection. A method of phase angle and amplitude correction is presented. This is also suitable for wide frequency and wide voltage. The simulation results show that the error of amplitude calculation is clearly improved and meets the requirement of protection accuracy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. U1866603).

**Key words:** synchronous condenser; reactive power compensation; SFC; start-up process; start-up protection

## 0 引言

近年来, 随着大容量、远距离特高压直流输电技术的推广应用, 电网“强直弱交”问题突出。根据特高压直流设计的原则, 直流系统在大规模输送有功功率的同时, 本身并不向系统提供无功, 由此导致动态过程中需从系统中大量吸收无功。同时,

直流换相失败还会引起送端系统暂态电压升高<sup>[1-5]</sup>, 严重情况下导致风机大面积脱网。为此, 国家电网公司在部分直流输电系统送、受端换流站配置 300 Mvar 大型同步调相机<sup>[6-7]</sup>, 并推进大型调相机在特高压直流工程送端和受端电网的部署应用, 实现“大直流输电、强无功支撑”, 提高“强直弱交”情况下交直流混联电网的安全稳定性, 改善特高压交直流混联电网的电压稳定和动态无功支撑能力<sup>[8-11]</sup>。

不同于汽轮、水轮机组的发电机<sup>[12-19]</sup>, 300 Mvar

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(U1866603)

大型同步调相机没有安装原动机, 无原动机消耗和产生有功, 因此发电机保护不完全都适用于调相机。文献[20]分别分析了 STATCOM 对输电线路距离保护和发电机失磁保护的影响。汽轮、水轮机组失磁保护采用异步边界阻抗圆判据<sup>[21-24]</sup>, 但由于调相机在正常工作过程中阻抗位于阻抗平面的第二象限, 失磁后进入第三象限, 其阻抗动作特性目前尚无明确规定<sup>[25]</sup>, 文献[25]分别对发电机和调相机的失磁故障动态过程和测量阻抗轨迹进行了仿真计算, 结论是很难采用圆或四边形阻抗特性对其进行整定。文献[26-28]搭建系统仿真模型, 证明了异步边界阻抗圆判据不适用于调相机失磁保护, 且验证了调相机接入会导致发电机失磁保护延时动作甚至拒动。文献[29]运用“多回路分析法”, 分析了部分匝间故障纵向零序电压保护存在拒动, 同时提出了完全裂相横差保护或不完全裂相横差保护来实现匝间故障保护。文献[30]分析了调相机在失磁后仍可维持同步运行, 不会导致失步, 因此调相机保护里可不必配置失步保护功能。为防止当调相机供电电源因故障断开后又发生非同步合闸, 文献[30]也提出了通过低电压保护动作以实现调相机的解列。

不同于汽轮、水轮机组的启机方式, 300 Mvar 大型同步调相机采用静止变频器(Static frequency converter, SFC)启动, 精准控制启机过程的电流、电压, 因 SFC 耐压受限, 需 SFC 退出后再升压惰转并网。汽轮、水轮机组启机过程长时间处于无励磁无源的升频过程, 工频附近时再加励磁有源升压。相比较而言, 调相机启机过程漫长且属于有源的启机, SFC 启机阶段长时间有源、变频低压、谐波含量高电气特征, 使得常规发电机组启机保护不完全适用于调相机。文献[31]对调相机启机过程对继电保护的影响得到的结论是相关的保护算法应与信号的频率无关, 建议采用低频传变特性良好的传感器, 能够正确计算低频状态下的电流电压模拟量, 但未对启机保护展开研究。文献[32]分析静止变频器容量与起动时间的关系, 给出了调相机冗余启动设计方案, 同样未对启机保护展开研究。

上述文献研究了调相机组与发电机组不同的保护原理及配置, 但由于调相机启机过程的变频、低压、高谐波等特征, 本文将启机过程作为研究重点, 所以本文侧重于分析大型同步调相机启机方式以及整个启机过程的短路故障电气特征, 着重分析了调相机变压器组不同保护对象启机保护的速动性和灵敏性, 并提出了一种全新的基于离散傅里叶变换算法的幅值和角度修正方法, 且对算法进行了实验验证, 提高了调相机启机保护的精度。本文目的

是为了提供更合理的调相机启机保护方案。

## 1 调相机的启机特征分析

调相机变压器组系统组成如图 1 所示, 一次系统包括调相机、主变压器、励磁变压器等, 调相机中性点采用高阻接地方式, 以利于降低接地故障电流。调相机机端侧与主变压器低压侧之间不安装断路器, 因此调相机变压器组通过主变压器高压侧断路器与电网系统同期并网, 调相机变压器组的启机方式是 SFC 注入变频电流以低频低压方式启机。

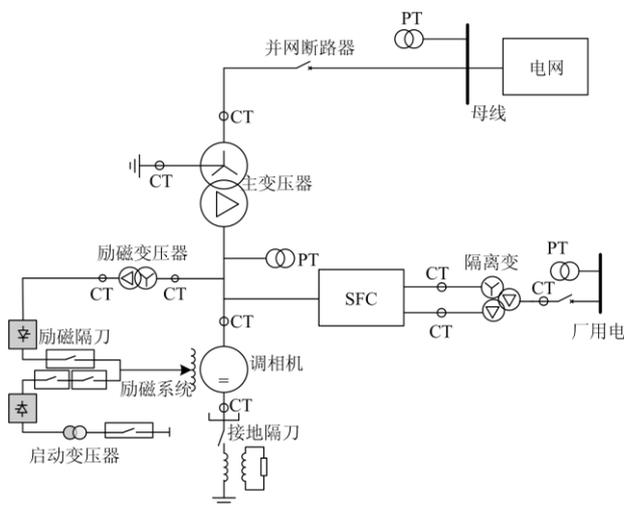


图 1 调相机组系统组成

Fig. 1 System composition of synchronous condenser

由于调相机的 SFC 是直接注入调相机的机端, 启机过程不同于汽轮发电机、水轮发电机、抽水蓄能机组。

### 1.1 汽轮、水轮发电机组的启机方式

汽轮发电机和水轮发电机因有原动机的存在, 不需采用 SFC 启机方式, 其启机过程是先升频, 再升压, 通过原动机控制频率大小、励磁控制机端电压大小, 最后在额定频率、额定电压大小附近并网。

### 1.2 抽水蓄能机组的启机方式

抽水蓄能机组的 SFC 是经升压隔离变压器再接至机组的, 由于升压隔离变压器的存在, SFC 可承受机端的额定电压, 因此抽水蓄能机组不需要 SFC 投入先升频至工频之上, 然后 SFC 退出再惰转并网, 而是 SFC 一直投入升频升压至额定频率、额定电压大小附近再并网, 并网后 SFC 才退出。

### 1.3 调相机的启机方式

调相机启机是通过 SFC 实现启机, 但启机过程不完全同于抽水蓄能机组, 抽水蓄能机组直接升至工频同期并网, 调相机组第一阶段频率升至比工频

略高, 启机过程调相机组比抽水蓄能机组多了 SFC 退出的升压惰转并网阶段。以某厂家的 SFC 为例, 调相机组启机过程主要包括两个阶段。

1) 启机 SFC 投入升频升压阶段

本阶段调相机机端电压从 0 V 升至 2 000 V, 频率由 5 Hz 升频到 52.5 Hz。为避免调相机过激磁, 本阶段机端电压调节的同时, 频率也是同步进行调节, 且按照  $U^*/f^* \leq 0.36$  进行调节。

2) 启机 SFC 退出升压惰转阶段

本阶段调相机机端电压在几秒内(约 4~5 s)从 2 kV 升至 20 kV, 频率由 52.5 Hz 降低到 50 Hz。

调相机、抽水蓄能机组、汽轮或水轮发电机组的启机过程是不同的, 区别如表 1 所示。

表 1 不同机组启机特征对比

Table 1 Start-up characteristics of different generator units

机组类型	启机方式	有无原动机	有无 SFC	SFC 注入方式	存在惰转并网
同步调相机	SFC	无	有	直接注入机端	有
抽水蓄能机组	SFC	有	有	经升压变注入机端	无
汽轮或水轮发电机组	原动机	有	无	/	无

1.4 调相机的短路故障分析

调相机正序阻抗(归算到 50 Hz 的 20 kV 侧):

$$X_{\pi} = X_d'' \times \frac{U_N^2}{S_N} = 0.1041 \times \frac{20^2}{300} = 0.139 \Omega \quad (1)$$

调相机额定电流(归算到 50 Hz 的 20 kV 侧):

$$I_e = \frac{S}{\sqrt{3} \times U} = \frac{300000000}{\sqrt{3} \times 20000} = 8660 \text{ A} \quad (2)$$

调相机在 SFC 投入升频升压阶段以及 SFC 退出升压惰转阶段的电压、频率变化过程中, 若机端发生三相短路故障, 则短路故障电流大小为

$$I_d = \frac{I_e}{X_d''} = \frac{U_{\text{变化}}^*}{f_{\text{变化}}^*} \quad (3)$$

不同阶段发生故障, 故障电流是不同的, 具体分析如下:

恒转动转矩阶段,  $U^*/f^*$  恒变比的升频升压阶段, 频率升至 13.9 Hz, 电压升至 2 kV, 此阶段理论故障电流恒定, 约为  $3.45I_e$ 。

恒电压升频阶段, 电压恒定为 2 kV, 频率升至 52.5 Hz, 此阶段理论故障电流逐渐减少, 52.5 Hz 对应故障电流约为  $0.91I_e$ 。

惰转升压并网阶段, 电压升至 20 kV, 频率惰

转至 50 Hz 左右, 此阶段理论故障电流逐渐增大, 20 kV 对应故障电流约为  $9.59I_e$ 。

整个启机过程不同阶段发生三相故障短路时的频率与电流特征分析如图 2 所示, 图 2 中  $I_e$  为调相机额定电流。

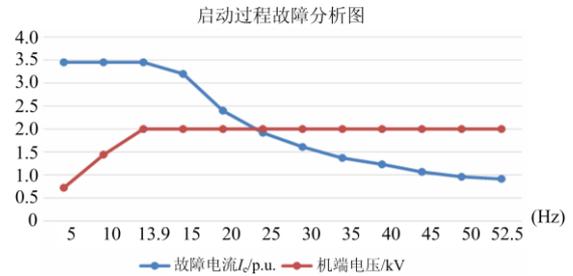


图 2 启机过程理论计算的故障电流与机端电压

Fig. 2 Fault current and terminal voltage calculated by theory in start-up process

2 调相机启机过程全区域保护及投退分析

2.1 调相机启机过程全区域保护

对主变压器、调相机、励磁变压器区域范围内发生的故障分别设定对应的保护, 形成启机主保护, 分别为主变启机速断保护、调相机启机差动保护、励磁变压器启机差动保护, 后备保护为启机过电流保护和启机零序过电压保护。本文分析重点是启机主保护。

2.1.1 主变启机速断保护

为避免并网断路器与并网电流互感器之间的死区故障发生时保护拒动, 不能选用主变压器高压侧与低压侧的电流互感器差动电流作为判据电流, 因为发生并网断路器死区故障时, 理论的差动电流为零, 又因为保护对象是主变压器, 因此, 应选择主变压器低压侧的电流或调相机机端侧的电流作为故障电流识别, 配置的保护是主变启机速断保护, 而不是主变启机差动保护。

配置了主变启机速断保护, 使得启机低频阶段主变区内故障时, 能保证 40 ms 左右切除故障, 如无配置, 仅能靠后备保护启机过电流保护动作切除故障, 故障切除时间一般为 0.5 s。

主变启机速断保护投入的条件是不满足此保护的并网判据条件, 此时并网判据条件是任一并网断路器处于合位并且 SFC 位置处于分位或机端电压高于设定并网电压。

2.1.2 调相机启机差动保护

调相机启机差动保护投入的条件是不满足此保护的并网条件判据, 此时并网条件判据是任一并网断路器处于合位并且 SFC 位置处于分位或满足主

变高压侧有流。

### 2.1.3 励磁变压器启机差动保护

首先以内蒙古扎鲁特工程为例, 分析配置励磁变压器启机差动保护的必要性。当励磁变压器低压侧三相短路故障时, 调相机阻抗有名值(归算到 50 Hz)为  $0.139 \Omega$ , 励磁变阻抗有名值(归算到 50 Hz 的 2 kV 的高压侧)为  $6.02 \Omega$ , 机端电压为 2 kV, 调相机侧流向励磁变压器低压侧短路点的电流为  $2000/(0.139+6.02)=324 \text{ A}$ , 按电流互感器变比 12500/5 折算为二次电流  $0.13 \text{ A}$ 。换言之, 在启机低频阶段, 当在励磁变低压侧发生三相短路故障时, 故障电流为  $0.13 \text{ A}$ , 如没配置励磁变启机差动保护, 按照扎鲁特工程的启机过电流保护定值整定为  $1.39 \text{ A}$ , 即启机过电流保护不会动作, 即发生保护拒动。若配置了励磁变启机差动保护, 当在励磁变低压侧发生三相短路故障时, 灵敏度大于 2, 保护可靠动作。

若配置了励磁变启机差动保护, 使得启机低频阶段励磁变低压侧发生区内故障时, 依靠励磁变启机差动保护动作能保证  $40 \text{ ms}$  左右快速切除故障, 如不配置励磁变启机差动保护, 而且启机过电流保护不满足电流动作条件, 将会发生保护拒动。

励磁变压器启机差动保护投入条件同调相机启机差动保护。

## 2.2 调相机启机过程保护投退分析

### 2.2.1 启机阶段投入的保护

启机保护、误上电保护、端口闪络保护仅在调相机组启机阶段投入, 并网后退出。

由于启机保护定值整定灵敏度高, 因此启机保护仅在启机过程中投入, 譬如启机过流保护如并网后不退出, 可能存在保护误动的风险, 因此启机保护需在调相机经主变压器并网后退出。

调相机盘车或静止时, 如发生出口断路器误合闸, 系统三相工频电压突然加在机端, 调相机会异步启动, 此时, 由系统向调相机定子绕组倒送的电流(正序电流)在气隙中产生的旋转磁场会在转子本体中感应工频或接近工频的电流, 从而引起转子过热而损伤转子, 因此误上电保护仅在启机过程中需要投入, 并网后退出。

调相机在并网的过程中, 当断路器两侧电压方向差异越大, 断口越易发生闪络, 当断路器两侧电压方向为  $180^\circ$  时, 断口最易发生闪络, 断路器断口闪络只考虑一相或两相, 不考虑三相闪络, 所以断口闪络保护是以负序电流作为判断条件, 并网后如不退出, 当发生不对称故障时可能会导致误动, 因此断口闪络保护仅在启机过程中投入。

### 2.2.2 启机阶段退出的保护

三次谐波电压的定子接地保护、低压解列保护、失磁保护、负序工频变化量方向匝间保护在调相机组并网后才投入, 启机阶段退出。

启机过程中由于无法准确测量调相机机端电压和中性点三次谐波电压, 因此启机过程中以三次谐波电压为主判据的 95% 定子接地保护是需要闭锁的, 并网后投入运行。

启机过程本身就是一个升压过程且长时间满足低电压条件, 因此启机阶段低压解列保护是退出的, 并网后投入运行。

失磁保护是通过电压条件和无功功率元件判别的, 在启机过程中需退出失磁保护, 否则失磁保护会误动, 并网后再投入失磁保护。

负序工频变化量方向匝间保护作为调相机匝间短路主保护判据, 在启机过程中由于 SFC 注入不对称电流, 可能会满足匝间保护的的条件, 因此启机过程是需要闭锁匝间保护的, 并网后投入运行。

## 3 调相机启机过程幅值新算法

当采样频率和信号实际频率不匹配, 即  $f_s \neq f \cdot N$  时, 这样造成的误差即非同步误差。

用相量表示其结果为

$$\begin{aligned} \hat{I}_m e^{j\varphi_m} &= I e^{j\varphi} e^{j\Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N}} \frac{\sin(\Delta\lambda\pi)}{\sin(\Delta\lambda\pi/N)} + \\ & I e^{-j\varphi} e^{-j\Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} + j\frac{2\pi}{N}} \frac{\sin(\Delta\lambda\pi)}{\sin(\Delta\lambda\pi/N + 2\pi/N)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中: 频率偏移系数为  $\Delta\lambda = \frac{f - f_s/N}{f_s/N}$ ,  $f$  为基波频率,  $f_s$  为采样频率,  $N$  为每周波的采样点数;  $I_m$  和  $\varphi_m$  分别为相量的幅值和相角。

如果  $\Delta\lambda = 0$ , 则  $I_m = I$ 、 $\varphi_m = \varphi$ , 是理想同步采样的情况, 采样频率是实际输入频率的整数倍, 傅里叶计算得到的幅值和相角与信号实际值相等。如果  $\Delta\lambda \neq 0$ , 则  $I_m \neq I$ 、 $\varphi_m \neq \varphi$ , 则是非同步采样。非同步采样条件下的相量测量误差如图 3 所示。

### 3.1 相角补偿算法

非同步采样条件下, 根据图 3 得到相量相角与真实相角的差值如式(5)所示。

$$\begin{aligned} \Delta\varphi &= \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 \approx \Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} + \\ & \frac{\sin(\Delta\lambda\pi)}{\sin(\Delta\lambda\pi/N + 2\pi/N)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi - 2\Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

相量相角  $\varphi_m$  的计算函数表达式如式(6)所示。

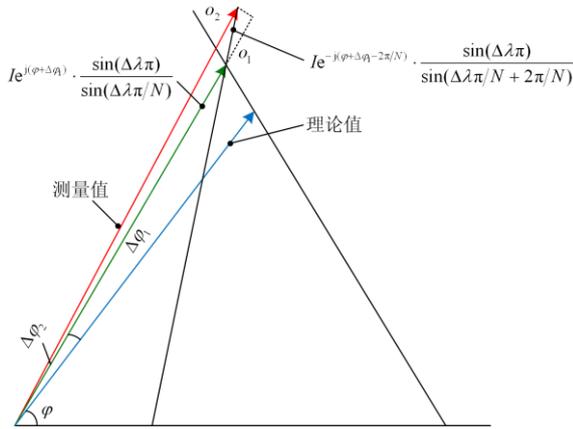


图 3 非同步采样条件下相量测量误差

Fig. 3 Phasor measurement error under asynchronous sampling conditions

$$\varphi_m \approx \Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} + \frac{\Delta\lambda\pi/N}{\sin(\Delta\lambda\pi/N + 2\pi/N)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_m\right) \approx \Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} + \frac{\Delta\lambda\pi/N}{\sin(2\pi/N)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_m\right) \quad (6)$$

因此，真实相角 \$\varphi\$ 与相量相角 \$\varphi\_m\$ 的关系如式(7)所示。

$$\varphi \approx \varphi_m - \Delta\lambda\pi \frac{N-1}{N} - \frac{\Delta\lambda\pi/N}{\sin(2\pi/N)} \cdot \sin\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_m\right) \quad (7)$$

### 3.2 幅值补偿算法

当 \$N\$ 比较大，\$\Delta\lambda\$ 比较小时，为简化计算，对幅值公式进行以下近似处理。

$$\frac{\sin(\Delta\lambda\pi)}{\sin(\Delta\lambda\pi/N)} \approx N \quad (8)$$

$$\varphi + \Delta\lambda\pi(N-1)/N \approx \varphi_m \quad (9)$$

$$\frac{\sin(\Delta\lambda\pi)}{\sin(\Delta\lambda\pi/N + 2\pi/N)} \approx \frac{\Delta\lambda N}{2} \quad (10)$$

通过上述公式近似处理，得到幅值的简化近似公式如式(11)所示。

$$I \approx I_m \left[ 1 + \frac{\Delta\lambda^2}{4} + \Delta\lambda \cos\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_m\right) \right]^{\frac{1}{2}} \approx I_m \left[ 1 + \frac{\Delta\lambda}{2} \cos\left(\frac{2\pi}{N} - 2\varphi_m\right) \right]^{-1} \quad (11)$$

### 3.3 仿真试验结果对比

与传统定频傅里叶幅值算法相比较，采用相角和幅值修正后的本算法，幅值计算精度有明显的提高，本算法与传统定频算法误差对比如图 4，幅值

误差缩减至 2.5% 以内，满足 5% 的保护精度要求。

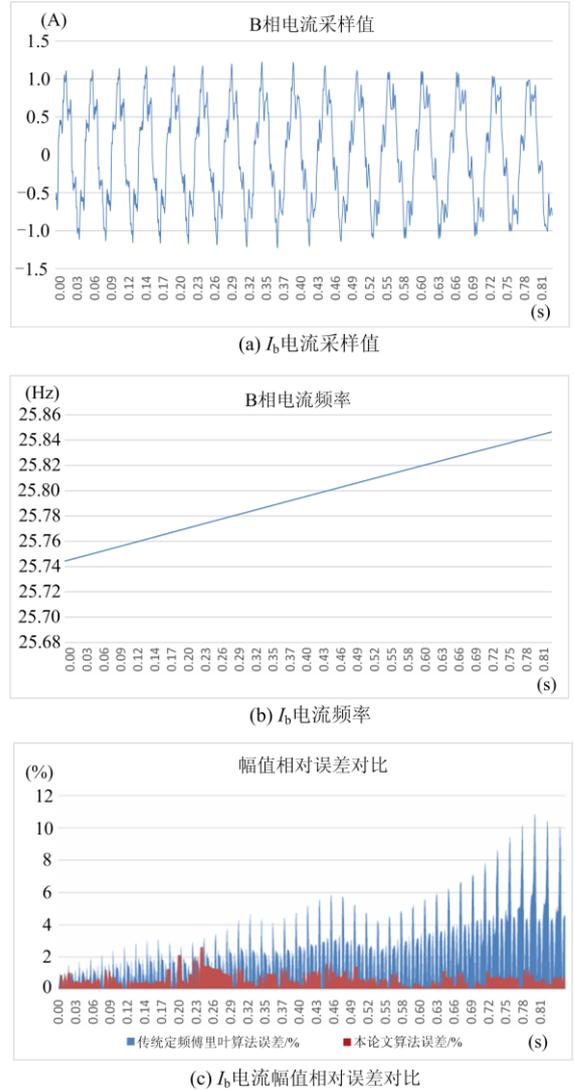


图 4 本算法与传统定频算法误差对比图

Fig. 4 Error comparison between this algorithm and traditional fixing-frequency algorithm

## 4 结语

大型同步调相机已先后在我国的内蒙古、酒泉换流站投入应用。本文针对调相机启机方式的特殊性，重点分析了其启机过程，并出于继电保护的可靠性、灵敏性和快速性考虑，提出了包含主变启机速断保护和励磁变启机差动保护在内的启机过程全区域保护；同时出于启机过程的宽频率、宽电压电气特征考虑，提出了相角和幅值的修正方法，大大减少了幅值的计算误差。

## 参考文献

[1] 付俊波, 凌卫家, 邓晖, 等. 抵御浙江电网多馈入直流

- 系统持续换相失败措施[J]. 电力建设, 2017, 38(8): 102-108.
- FU Junbo, LING Weijia, DENG Hui, et al. Measures for continuous commutation failures of multi-infeed HVDC system in Zhejiang Power Grid[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(8): 102-108.
- [2] 张红丽, 刘福锁, 侯玉强, 等. 直流低功率运行下受端电网调相机调度策略[J]. 电子设计工程, 2019, 27(7): 98-103, 108.
- ZHANG Hongli, LIU Fusuo, HOU Yuqiang, et al. Synchronous compensators scheduling strategy considering the HVDC low-power-operation[J]. Electronic Design Engineering, 2019, 27(7): 98-103, 108.
- [3] 周保荣, 金小明, 吴小辰, 等. 特高压直流对交直流并联电网安全稳定影响[J]. 南网电网技术, 2010, 4(2): 31-34.
- ZHOU Baorong, JIN Xiaoming, WU Xiaochen, et al. Influence of UHVDC System on the security and stability of AC/DC interconnected power grid[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(2): 31-34.
- [4] 楼伯良, 杨少杰, 叶琳, 等. 大容量无功补偿装置在浙江受端电网的落点优选方法[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 96-101.
- LOU Boliang, YANG Shaojie, YE Lin, et al. Optimization method for large capacity reactive power compensation device in Zhejiang receiving end power grid[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(10): 96-101.
- [5] 黄科维, 刘文泽, 袁虎强, 等.  $\pm 800$  kV 直流站控异常切换原因分析及改进措施[J]. 高压电器, 2018, 54(10): 38-42.
- HUANG Kewei, LIU Wenzhe, YUAN Huqiang, et al. Abnormal switching analysis and improved measures of DC station control in  $\pm 800$  kV converter station [J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(10): 38-42.
- [6] 崔一铂, 李冰, 沈骏杰, 等. 大型调相机组调试及运行维护保障技术研究[J]. 湖北电力, 2016, 40(5): 5-8, 12.
- CUI Yibo, LI Bing, SHEN Junjie, et al. Research on implementation approach of debugging and operating maintenance for the large synchronous condenser[J]. Hubei Electric Power, 2016, 40(5): 5-8, 12.
- [7] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid[J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [8] 肖繁, 王涛, 高扬, 等. 基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 93-100.
- XIAO Fan, WANG Tao, GAO Yang, et al. Research on reactive power compensation and fast response mechanism of synchronous condenser based on UHVAC/DC hybrid grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 93-100.
- [9] 谭闻. 大容量调相机动模试验平台构建方法及其应用[J]. 浙江电力, 2018, 37(3): 1-6.
- TAN Wen. Construction method of dynamic model test platform for large capacity synchronous condenser and its application[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(3): 1-6.
- [10] 解兵, 徐珂, 罗凯明, 等. 大型调相机无功调节能力试验技术研究[J]. 广东电力, 2019, 32(6): 124-129.
- XIE Bing, XU Ke, LUO Kaiming, et al. Research on test technology of reactive power regulation of large synchronous condenser[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(6): 124-129.
- [11] 阮羚, 王庆, 凌在汛, 等. 新型大容量调相机性能特点及工程应用[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 57-61.
- RUAN Ling, WANG Qing, LING Zaixun, et al. Study on the performance feature and key engineering application of new large capacity condenser[J]. Electric Power, 2017, 50(12): 57-61.
- [12] 辜承林, 陈乔夫, 熊永前. 电机学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [13] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [14] 王维俭, 侯炳蕴. 大型机组继电保护理论基础[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989.
- [15] YANG Y, SONG A, LIU H, et al. Parallel computing of multi-contingency optimal power flow with transient stability constraints[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 204-213. DOI: 10.1186/s41601-018-0095-z.
- [16] 张旭航, 黄阮明, 曹炜, 等. 短路电流直流分量实用计算方法研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 169-174, 181.
- ZHANG Xuhang, HUANG Ruanmin, CAO Wei, et al. Research on practical calculation method of DC component of short circuit current[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(5): 169-174, 181.
- [17] 李志坚, 潘书燕, 宋斌, 等. 智能变电站站域保护控制装置的研制[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(13): 107-113.
- LI Zhijian, PAN Shuyan, SONG Bin, et al. Development of substation-area protection and control device in smart substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(13): 107-113.
- [18] 李志坚, 姜利华, 陈丽红, 等. 数字化保护装置时钟同步的实现[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 105-109.

- LI Zhijian, JIANG Lihua, CHEN Lihong, et al. Time synchronizing implementation for digital protection devices[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 105-109.
- [19] 高春如. 大型发电机组继电保护整定计算与运行技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [20] 刘青, 王增平, 张媛. 消除 STATCOM 对线路距离保护影响方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 93-98.
- LIU Qing, WANG Zengping, ZHANG Yuan. Research of a new method of eliminating the effect of STATCOM on distance protection[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 93-98.
- [21] 姚晴林. 同步发电机失磁及其保护[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
- [22] 翁洪杰. 励磁调节器低励限制与发电机失磁保护配合分析[J]. 广东电力, 2011, 24(11): 112-114.
- WENG Hongjie. Analysis on matching of low excitation limitation of excitation regulator and loss-of-excitation protection of generators[J]. Guangdong Electric Power, 2011, 24(11): 112-114.
- [23] ELSAMAHY M, FARIED S O, SIDHU T. Impact of midpoint STATCOM on generator loss of excitation protection[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2): 724-732.
- [24] GHORBANI A, MOZAFARI B, SOLEYMANI S, et al. Operation of synchronous generator LOE protection in the presence of shunt-FACTS[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 119: 178-186.
- [25] 罗凌, 李振文, 宋兴荣, 等. 大容量调相机继电保护配置方案研究[J]. 湖南电力, 2016, 36(5): 26-30.
- LUO Ling, LI Zhenwen, SONG Xingrong, et al. Study on the relay protection scheme of high-capacity synchronous condenser[J]. Hunan Electric Power, 2016, 36(5): 26-30.
- [26] 郑涛, 余青蔚, 詹荣荣, 等. 调相机接入对发电机失磁保护的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 50-56.
- ZHENG Tao, YU Qingwei, ZHAN Rongrong, et al. Impact of synchronous condenser access on generator loss of excitation protection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 50-56.
- [27] 王晓东, 时俊雅, 李淳, 等. 学习资源精准推荐模型及应用研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(1): 26-32.
- WANG Xiaodong, SHI Junya, LI Chun, et al. Accurate recommendation model and application of learning resources[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(1): 26-32.
- [28] 屈龙江, 李康荃. 有限域上分圆映射对合的构造、计数与分类[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2019, 47(4): 1-15.
- QU Longjiang, LI Kangquan. Constructions, counts and classifications of cyclotomic involutions over finite fields[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2019, 47(4): 1-15.
- [29] 桂林, 李岩军, 詹荣荣, 等. 大型调相机内部故障特征及纵向零序电压保护性能分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 145-149.
- GUI Lin, LI Yanjun, ZHAN Rongrong, et al. Analysis of internal fault characteristics and longitudinal zero-sequence overvoltage protection performance of large-scale condenser[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 145-149.
- [30] 邹东霞, 余锐, 聂娟红, 等. 300 Mvar 大型同步调相机的启动及继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 160-164.
- ZOU Dongxia, YU Rui, NIE Juanhong, et al. SFC start and relay protection of 300 Mvar large synchronous condenser[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 160-164.
- [31] 李玉平, 桑建斌, 包明磊, 等. 高压变频工况下调相机启机保护的分析和改进[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 184-190.
- LI Yuping, SANG Jianbin, BAO Minglei, et al. Analysis and improvement of starting protection for synchronous condenser in high-voltage variable frequency condition[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 184-190.
- [32] 王潇, 周平, 王洋, 等. 大容量调相机静止变频器启动方式研究[J]. 电气技术, 2016, 17(10): 31-35.
- WANG Xiao, ZHOU Ping, WANG Yang, et al. Bushing PD analysis and electric field simulation large capacity synchronous compensator[J]. Electrical Engineering, 2016, 17(10): 31-35.

收稿日期: 2019-11-29; 修回日期: 2020-03-06

作者简介:

李志坚(1976—), 男, 通信作者, 硕士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: lizhijian@sgepri.sgcc.com.cn

吴崇昊(1974—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护; E-mail: wuchonghao@sgepri.sgcc.com.cn

万洛飞(1984—), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为电力系统继电保护。E-mail: wanluofei@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 魏小丽)