

## 基于相角差时间函数调相机并网合闸时间预测

蒋梦瑶<sup>1</sup>, 汤晓峥<sup>2</sup>, 刘一丹<sup>2</sup>, 赵宏飞<sup>2</sup>, 马宏忠<sup>1</sup>, 陈明<sup>1</sup>

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:**针对大型同步调相机并网条件差、成功率低的问题,对传统的相角差时间函数加以改进,改进后的曲线能够体现相角差在0到 $2\pi$ 之间的变化规律,且直观表示出在一定的滑差转速范围内是否存在同期点和其存在个数以及在一定的相角差范围内所对应的合闸时间范围,为预计合闸脉冲发出时刻提供了很大便利。通过算例分析了当以惰性减速起始时刻为0时刻点,  $-0.167 \text{ r/s}^2$ 为加速度开始惰性减速时,最大允许滑差范围内出现的同期点个数,以及调相机允许的合闸时间范围,并在 Matlab/Simulink 仿真软件上验证了算例分析结果的正确性。同时,以调相机所受冲击电流作为最大允许相角差的整定依据有效减少了并网时对调相机的冲击,提高了并网的成功率。

**关键词:**调相机;并网;同期;相角差;滑差

中图分类号:TM306

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)02-0018-05

### 0 引言

随着远距离直流输电电网的规模化建设,其电压等级、输电容量不断提高,换流站无功补偿的容量需求也越来越大,尤其是动态无功的补偿对于直流输电系统的电压稳定起着非常重要的作用<sup>[1-6]</sup>。调相机具有可靠性更高、容量更大、动态维持电压能力强的特点,在电网扰动情况下,能够通过强励及时提供大容量动态无功<sup>[7-9]</sup>。因此,为保证国家电网的安全性、可靠性及经济性,大容量同步调相机在电网中得到了重点应用<sup>[10-11]</sup>。

300 MW 大容量同步调相机快速并网采用如下方案:在励磁系统的配合下,静止变频器(static frequency converter, SFC)拖动机组转子由盘车状态(快速再启动除外)加速。启动过程中,励磁系统采用他励回路,拖动调相机转子加速至52.5 Hz后, SFC退出。由于失去了驱动力,调相机转子开始惰性减速,在惰性减速过程中,励磁系统将切换至主励磁回路,启动励磁退出。在确认 SFC 已经与定子可靠断开后,励磁系统进入升压流程,并建立额定机端电压。在后续的惰性降速过程中,由准同期装置给励磁系统发指令,将调相机的机端电压调整到允许范围。当同期装置检测到频率差和电压差都在同期允许范围内,同时捕捉到 $0^\circ$ 相位差时,发出合闸指令,将调相机并入电网<sup>[12-13]</sup>。

这与发电机常规并网过程最大的不同之处在于, SFC 退出之后,调相机转速不再可控,所以同期点捕捉的条件非常严苛,难以把握<sup>[14-15]</sup>。如果要提高并网成功率,就要在同期时将频差和相角差控制在允许的范围内从而降低同期并网对调相机的冲击,这就要求精准地获得调相机并网时的同期点。因此,针对现有的相角差时间函数曲线无法直观获得同期点时间的问题,对传统的相角差时间公式加以改进,从而有效预计合闸脉冲发出时刻,实现调相机的可靠并网。

### 1 考虑滑差变化的调相机并网分析

#### 1.1 现有的相角差时间函数

调相机准同期并网的4个条件是:同相序,等电压,等频率及同相角差。其中,调相机电压相序与系统电压相序相同比较容易满足。在并网过程中,调相机的机端电压也可以通过调节励磁系统控制。而频率绝对相等几乎是不可能的,调相机转子的惰性降速导致其与系统之间的滑差角频率在不断变化。正是由于两侧存在滑差,使得相角差在0到 $2\pi$ 之间变化,从而产生了同期点(0点和 $2\pi$ 点)。当频率被控制在允许范围内时,把握好相角差为0的时机,在4个同期条件同时满足时断路器主触头接通,实现调相机平稳并网<sup>[16]</sup>。

正式并网过程中,调相机转速以一定的规律下降,假定系统频率不变,则二者之间存在着一个不断变化的滑差转速,滑差转速与滑差角频率之间的关系为 $\omega = 2\pi n$ ,从而产生了在0到 $2\pi$ 间不断变化的相角差 $\Delta\varphi(t)$ ,可以表示为式(1):

收稿日期:2019-09-22;修回日期:2019-10-18

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51577050);111 引智计划“新能源发电与智能电网学科创新引智基地”资助项目(B14022)

$$\Delta\varphi(t) = \int_{t_0}^t (\omega_0 + a_\omega(t)t - \omega_n) dt + \Delta\varphi_0 \quad (1)$$

式中:  $t_0$  为主励回路投入、额定机端电压建立后捕捉同期点的开始时间;  $\Delta\varphi_0$  为开始时刻的相角差;  $a_\omega(t)$  为调相机的转速变化角加速度;  $\omega_n$  为额定转速;  $\omega_0$  为调相机在并网起始时刻的角速度。

当调相机频率高于系统侧时,相角差往正方向增加;当调相机频率低于系统侧时,相角差往负方向增加。当  $\Delta\varphi(t)$  超出范围  $(-\pi, \pi)$  时,其物理含义为:  $\Delta\varphi(t)$  加减  $2\pi n$  后转换至  $(-\pi, \pi)$  区间中的相位角差值。由于大型同步调相机惯性大,在较短的时间内,  $a_\omega(t)$  可认为是一个常量  $a_0$ 。式(1)可表示为式(2):

$$\Delta\varphi(t) = 0.5a_0t^2 + (\omega_0 - \omega_n)t - (\omega_0 - \omega_n)t_0 - 0.5a_0t_0^2 + \varphi_0 \quad (2)$$

假设允许合闸的相角差范围为  $[-\varphi_d \pm 2\pi n, \varphi_d \pm 2\pi n]$ , 合闸时间  $t_h$  应满足  $\Delta\varphi(t_h) \in [-\varphi_d \pm 2\pi n, \varphi_d \pm 2\pi n]$ , 相角差时间函数曲线如图 1 所示。现有的相角差时间曲线无法直观显示出相角差在 0 到  $2\pi$  之间变化的周期性以及显示同期点出现时间和个数,所以对相角差计算公式做出改进。

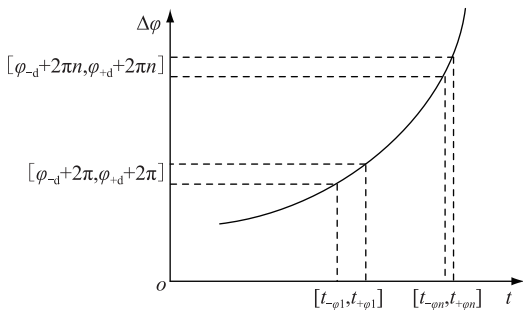


图 1 调相机惰速过程中相角差时间曲线

Fig.1 Time curve of phase angle difference in inert speed process of synchronous condenser

## 1.2 改进的相角差时间函数

假设调相机惰速过程中加速度为  $a$  不变,系统的频率恒定,以惰速减速开始时刻为 0 时刻,则相角差时间公式可表示为:

$$\Delta n = at + \Delta n_0 \quad (3)$$

$$S(t) = \int_0^t (at + \Delta n_0) dt \quad (4)$$

$$\Delta\varphi(t) = (S - [S]) \times 360^\circ + \Delta\varphi_0 \quad (5)$$

式中:  $\Delta n$  为调相机与系统之间的滑差转速;  $\Delta n_0$  为 0 时刻调相机与系统之间的滑差转速;  $S$  为  $t$  时刻调相机与系统之间的差程,  $[S]$  表示将  $S$  取整。由式(5)得相角差时间曲线如图 2 所示(假设  $\Delta\varphi_0 \approx 0^\circ$ ),由式(3)得滑差转速和时间曲线如图 3 所示。

图 3 中  $t_1$  时刻滑差转速为 0,此时调相机和系统

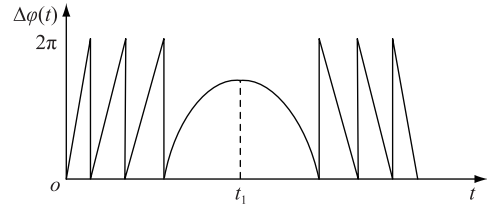


图 2 相角差时间曲线

Fig.2 Phase angle difference time curve

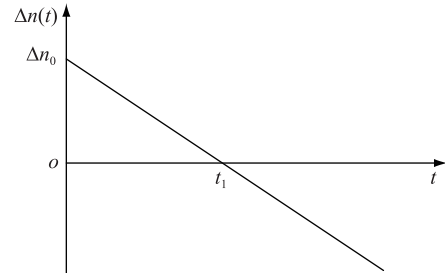


图 3 滑差转速时间曲线

Fig.3 Curve of slip speed time

之间的相角差变化率为 0,如图 2 中  $t_1$  时刻所示。由图 2 可见相角差在 0 到  $2\pi$  之间的变化规律:开始时斜率较大是由于滑差较大,随着调相机转子的减速,滑差减小,变化率也逐渐减小,当下降到系统频率以下时,两者滑差再次增大,曲线的变化率再次增大;当滑差转速范围取的大时,对应的时间内出现同期点(曲线和  $x$  轴的交点)的个数越多,即可供断路器合闸的时机越多,合闸成功率越高。但还需指出,如果并列时滑差较大,即使合闸时的相角差很小,满足要求,这时待并调相机需要经历一个很长的暂态过程才能进入同步运行状态,严重时甚至失步,这是不允许的。综合考虑,调相机实际并网时滑差转速取  $0.8 \text{ r/s}$ <sup>[17]</sup>。

下面通过整定可允许的相角差范围来确定断路器的具体可合闸时间。在相当长的一段时间内,负责调相机运行的操作人员一般更关心同期并网是否成功,却很少定量计算并网时冲击电流对调相机的影响。一般以冲击电流来整定调相机最大允许的相角差,冲击电流最大瞬时值一般设置在 1~2 倍额定电流以下为宜,现场实际应用时,为确保在调相机并网时不产生较大冲击,应控制在额定电流以下<sup>[18]</sup>。如果想要进一步降低冲击电流,也可以选择 1/2~1/3 倍的额定电流来整定相角差,但此时相角差必然减小,可合闸范围也就相应减少。

$$i''_{\text{hm,max}} = 1.8\sqrt{2}I''_h = 1.8\sqrt{2} \frac{\Delta U_s}{X''_q} \left( 2\sin \frac{\Delta\varphi}{2} \right) \quad (6)$$

式中:  $i''_{\text{hm,max}}$  为冲击电流的最大值;  $I''_h$  为冲击电流有效值;  $\Delta U_s$  为系统电压的有效值;  $X''_q$  为调相机横轴

超瞬变电抗,其值与  $X''_d$  相近。经整定后的相角差可通过上述图 2 和图 3 定位到具体的合闸时间,下面以一个算例来具体分析并仿真验证。

## 2 算例和仿真分析

### 2.1 调相机并网合闸时间范围的计算分析

根据某型 300 Mvar 空冷调相机的参数:额定频率为 50 Hz,额定转速为 50 r/s,横轴超瞬变电抗为 10.71%,直轴超瞬变电抗为 10.41%,定子额定电压为 20 kV,定子额定电流为 8 660 A。定子启动过程中,SFC 将其拖至 1.05 倍额定转速即 52.5 r/s 后开始惰性减速,经试验得出惰性减速加速度  $a$  为  $-0.167 \text{ r/s}^2$ ,则此时由额定电流整定的最大允许相角差为:

$$\Delta\varphi = 2\arcsin \frac{X''_q i''_{hm,\max}}{3.6\sqrt{2}\Delta U_s} = 2.41^\circ \quad (7)$$

由图 2、图 3 和式(3)一式(5)得图 4、图 5。

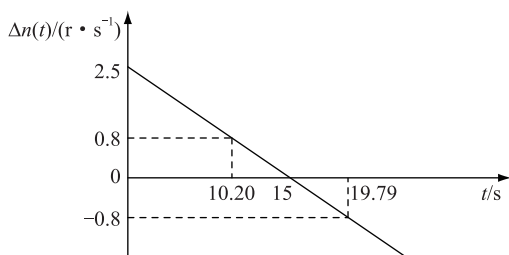


图 4 转速差时间曲线

Fig.4 Curve of speed difference time

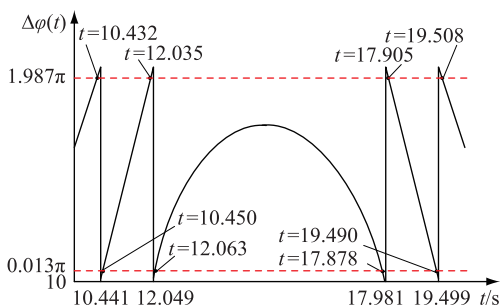


图 5 改进后的相角差时间曲线

Fig.5 Improved phase angle difference time curve

由于将调相机并网的滑差转速范围最大取值为  $0.8 \text{ r/s}$ ,以惰性降速开始时刻为 0 时刻点,则由图 4 可见允许滑差转速范围内的时间范围为  $10.20 \sim 19.79 \text{ s}$ 。根据图 5 可见,在允许的时间范围内出现了 4 个同期点(相角差为 0 点),分别为:  $10.441 \text{ s}$ ,  $12.049 \text{ s}$ ,  $17.891 \text{ s}$  和  $19.499 \text{ s}$ 。由式(5)和式(7)得出最大允许相角差为  $2.41^\circ$ ,对应可合闸时间范围为  $10.432 \sim 10.450 \text{ s}$ ,  $12.035 \sim 12.063 \text{ s}$ ,  $17.878 \sim 17.905 \text{ s}$  以及  $19.49 \sim 19.508 \text{ s}$ 。

### 2.2 调相机并网同期点的仿真确定

根据 2.1 算例中的参数,用 Matlab/Simulink 软件仿真同步调相机并网过程。在仿真模型中,调相机参数依据上述算例中的某型 300 Mvar 空冷调相机,系统频率为 50 Hz。在调相机惰速并网过程中,相角变化如图 6 所示。

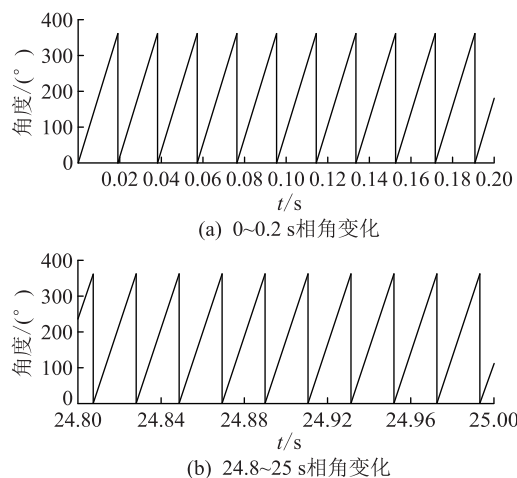


图 6 调相机惰速过程中相角变化

Fig.6 Phase angle change diagram during inert deceleration of synchronous condenser

可见,随着时间的推移,相角变化速率减慢,体现了调相机惰速的过程。而调相机与系统之间相角差随时间的变化规律如图 7 所示。

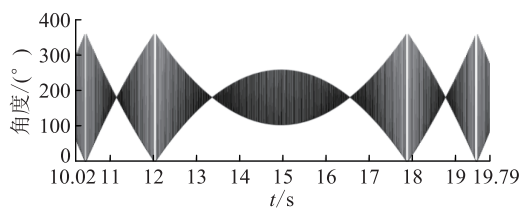


图 7 相角差随时间变化规律

Fig.7 The law of phase angle difference changing with time

由图 7 可见,在允许的滑差转速范围对应的时间内,即  $10.20 \sim 19.79 \text{ s}$  中出现了 4 个相角差为 0 的点,即同期点,分别为  $10.441 \text{ s}$ ,  $12.049 \text{ s}$ ,  $17.891 \text{ s}$  和  $19.499 \text{ s}$ ,和前面算例分析一致。同时,在  $15 \text{ s}$  时相角差变化率接近于 0,表明此时调相机频率和系统频率近似相等。

## 3 结论

由于大型同步调相机的动态无功补偿特性在直流输电系统电压稳定中起到了非常重要的作用而在特高压电网中得到广泛应用,但调相机并网过程属于惰速减速,这给同期点的捕捉增加了难度。据此,对现有的相角差时间函数曲线无法直观获得

同期点时间的问题,对传统的相角差时间公式加以改进。

(1) 改进后的相角差时间公式能够直观表示出相角差在  $0$  到  $2\pi$  之间的变化规律,并体现出一定滑差转速范围内同期点是否存在及其存在的个数,同时还能看出允许相角差范围内可合闸的具体时刻,这为同期并网的合闸脉冲发出时间整定带来了便利。

(2) 结合算例和仿真分析得出当以惰性降速开始时刻为  $0$  时刻,  $-0.167 \text{ r/s}^2$  为加速度开始惰性减速时,最大允许相角差范围内出现了 4 个同期点,即  $10.441 \text{ s}$ ,  $12.049 \text{ s}$ ,  $17.891 \text{ s}$  和  $19.499 \text{ s}$ ,调相机可合闸时间范围整定为  $10.432 \sim 10.450 \text{ s}$ ,  $12.035 \sim 12.063 \text{ s}$ ,  $17.878 \sim 17.905 \text{ s}$  和  $19.49 \sim 19.508 \text{ s}$ ,算例结果和仿真结果得到相互印证。该整定方法以调相机所受冲击电流作为最大允许相角差的整定依据,减小了并网时对调相机的冲击,更加精准地预测了合闸脉冲发出时刻,提高了调相机同期并网的成功率。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019114)资助,谨此致谢!

#### 参考文献:

- [1] 刘振亚,张启平,王雅婷,等. 提高西北新甘青 750 kV 送端电网安全稳定水平的无功补偿措施研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(5):1015-1022.  
LIU Zhenya,ZHANG Qiping,WANG Yating,et al. Research on reactive compensation strategies for improving stability level of sending-end of 750 kV grid in northwest China[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(5):1015-1022.
- [2] 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.
- [3] 唐晓骏,陈会元,姚淑玲,等. 基于改进经济压差的特高压电网无功电压控制策略[J]. 电网技术,2013,37(3):673-678.  
TANG Xiaojun,CHEN Huiyuan,YAO Shuling,et al. Reactive power and voltage control strategy for UHVAC power grid based on improved economic voltage difference[J]. Power System Technology,2013,37(3):673-678.
- [4] FAN Shixiong,HAN Wei,LI Lixin,et al. Influence of synchronous condenser exciter limit on voltage stability of HVDC[C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),Wuhan,China,Jun 2018:210-215.
- [5] 耿少博,顾乔根,常风然,等. 交直流混合配电网分布式无功电压互动控制策略[J]. 电力工程技术,2019,38(4):26-33.  
GENG Shaobo,GU Qiaogen,CHANG Fengran,et al. Distributed reactive voltage and voltage interactive control strategy for AC/DC hybrid distribution network[J]. Electric Power Engineering Technology,2019,38(4):26-33.
- [6] 翟海保,李兆伟,黄慧,等. 特高压直流分层接入电网的落点选择研究[J]. 电力工程技术,2018,37(1):65-71.  
ZHAI Haibao,LI Zhaowei,HUANG Hui,et al. Terminal location selection study for UHVDC hierarchical connection to power grid[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(1):65-71.
- [7] 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.
- [8] 陶骞,王庆,阮羚,等. 特高压直流工程大型调相机组启动调试及关键技术[J]. 中国电力,2017,50(12):51-56.  
TAO Qian,WANG Qing,RUAN Ling,et al. Contents and key technical problems in start-up and commissioning of large-scale synchronous condenser in UHVDC project[J]. Electric Power,2017,50(12):51-56.
- [9] 任章鳌,闫迎,晏桂林,等. 特高压直流系统中大容量双水内冷调相机的作用及关键技术研究[J]. 高电压技术,2019,45(6):1795-1802.  
REN Zhang'ao,YAN Ying,YAN Guilin,et al. Research on the function and key technology of large capacity dual-water internal cooling synchronous condenser in UHVDC system[J]. High Voltage Engineering,2019,45(6):1795-1802.
- [10] 覃琴,郭强,周勤勇,等. 国网“十三五”规划电网面临的安全稳定问题及对策[J]. 中国电力,2015,48(1):25-32.  
QIN Qin,GUO Qiang,ZHOU Qinyong,et al. The security and stability of power grids in “13th Five-Year” planning and countermeasures[J]. Electric Power,2015,48(1):25-32.
- [11] 金一丁,于钊,李明节,等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术,2018,42(7):2095-2102.  
JIN Yiding,YU Zhao,LI Mingjie,et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid[J]. Power System Technology,2018,42(7):2095-2102.
- [12] FAN Shixiong,HAN Wei,WANG Wei,et al. Influence of synchronous condenser transient parameters on voltage stability of HVDC[C]//2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA),Wuhan,China,Jun 2018:2015-2020.
- [13] ZHANG Kaiyu,CUI Yong,YANG Zenghui,et al. Analysis of the influence of synchronous condensers on receiving-end grid with multi-infeed HVDC[C]//2016 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON),Wollongong,Australia,Sept 2016.
- [14] PU Ying,ZHONG Qidi,LI Xuan,et al. Influence of synchronous condenser on voltage stability of HVDC[C]//2018 IEEE

- Power & Energy Society General Meeting(PESGM), Porland, Aug 2018.
- [15] 沙江波,赵成勇,王庆,等. 同步调相机对特高压直流输电系统最大传输功率的影响[J]. 高电压技术,2019,45(11):3627-3634.
- SHA Jiangbo,ZHAO Chengyong,WANG Qing,et al. Impact of synchronous condensers on maximum available power of UHVDC system [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3627-3634.
- [16] 曾先锋,侯炜,陈俊. 大型调相机惰速同期并网可靠性研究[J]. 中国电力,2017,50(12):38-43.
- ZENG Xianfeng,HOU Wei,CHEN Jun. Reliability research on idle speed synchronization of large condenser [J]. Electric Power,2017,50(12):38-43.
- [17] 赵永正,代海涛,王安东,等. 高压直流输电系统中调相机的启动与并网策略[J]. 山东电力技术,2017,44(2):20-22.
- ZHAO Yongzheng,DAI Haitao,WANG Andong,et al. Start-up and grid-connection strategies of phase modifiers in HVDC system[J]. Shandong Electric Power,2017,44(2):20-22.
- [18] 周仁怀. 秦山核电厂应急柴油发电机手动同期并网冲击电流分析[J]. 核动力工程,2015,36(S1):155-158.
- ZHOU Renhuai. Analysis of manual synchronization surge current of emergence diesel generator in Qinshan nuclear power plant[J]. Nuclear Power Engineering,2015,36(S1):155-158.

作者简介:



蒋梦瑶

蒋梦瑶(1996),女,博士在读,研究方向为调相机状态监测及故障诊断(E-mail:daisy\_jiang17@163.com);

汤晓峥(1976),男,学士,高级工程师,从事特高压交直流系统运维管理工作;

刘一丹(1972),男,硕士,高级工程师,从事电力系统继电保护及调相机运维工作。

### Prediction of grid-connected closing time of synchronous condenser based on improved phase-difference time function

JIANG Mengyao<sup>1</sup>, TANG Xiaozheng<sup>2</sup>, LIU Yidan<sup>2</sup>, ZHAO Hongfei<sup>2</sup>, MA Hongzhong<sup>1</sup>, CHEN Ming<sup>1</sup>

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Branch Company, Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Aiming at the problem of poor grid connection condition and low success rate of large synchronous condenser, the traditional phase angle difference time function is improved. The improved curve can reflect the change rule of phase angle difference between 0 and  $2\pi$ , and directly show whether there are synchronization points and their number in a certain slip speed range and the corresponding closing time range in a certain phase angle difference range. It is very convenient to predict the time when the closing pulse is sent out. When the initial moment of inert deceleration is 0 and the acceleration starts to decelerate with  $-0.167\text{ r/s}^2$  as the starting point of inert deceleration, the number of simultaneous points within the maximum allowable slip range and the closing time range allowed by the synchronous condensers are analyzed through examples, and the correctness of the example analysis results is verified by Matlab/Simulink simulation software. At the same time, taking the impulse current of the phase modulator as the setting basis of the maximum allowable phase angle difference can effectively reduce the impact on the synchronous condenser when connected to the grid, and improve the success rate of connected to the grid.

**Keywords:** synchronous condenser; grid connected; synchronization; phase angle difference; slip frequency

(编辑 钱悦)