

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.027

静止变频器分阶段启动控制策略研究

黄东启, 单学彪, 何嘉希, 梁超, 季振东

(南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要:静止变频启动方式作为抽水蓄能机组的主要启动方式,具有启动电流可控、可频繁启动、调速范围宽等优点。转子处于低速状态时,根据机端电压计算出的转速不准确,造成传统控制方法输出的电磁转矩误差较大。针对此问题,文中首先基于同步电机静止变频系统工作原理,提出一种改进型静止变频器(SFC)控制方法。在低速阶段,整流电路采用触发延迟角开环控制,使SFC持续提供充足的加速转矩,转子能够按照一定的加速度上升,逆变电路采用前馈和反馈控制,使直流电流快速上升并维持稳定;在高速阶段,整流电路采用触发延迟角双闭环控制,逆变电路采用负载换相法实现换相。然后,文中提出闭环控制器参数设计方法,提高直流回路稳定性以及静止变频系统动态性能。最后,通过仿真验证了所提控制策略及参数设计方法的有效性。

关键词:静止变频器(SFC);同步电机启动;整流控制;逆变控制;换相方法

中图分类号:TM46

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2020)06-0184-07

0 引言

随着负荷增长以及新能源发电渗透率逐渐升高,电网峰谷差不断扩大^[1-2]。抽水蓄能机组具有启停灵活、反应迅速的特点^[3-4],在电力系统中常作为调频机组和紧急事故备用机组^[5-6]。同时,抽水蓄能电站具有良好的储能特性,可以减小电网运行峰谷差,实现削峰填谷^[7-8]。但抽水蓄能机组转动惯量大、启动电流大,故实现平稳启动、限制启动电流是其启动过程亟需解决的难题^[9-10]。

同步电机的常用启动方法有3种,包括辅助电动机启动、异步启动和变频启动^[11-12],其中利用静止变频器(static frequency converter, SFC)实现变频启动最具优势^[13-14]。同步电机的变频启动可以分为他控和自控2种方式。他控式SFC需要根据同步电机的转动惯量制定输出功率曲线,启动过程易出现振荡及失步问题^[15];自控式SFC输出功率及频率可以跟踪转子转速,有效避免了失步问题^[16]。文献[17]对基于绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的静止变频系统进行同步电机变频启动研究,但由于IGBT在耐压等级和容量方面的劣势,目前无法取代晶闸管在静止变频系统的使用。文献[18]提出了一种静止变频系统的控制策略,即低速阶段采用断续换相法,高速阶段采用自然换相法,如果启动全过程由转速环产生直流电流的参考值,会导致直流电流过大,电磁转矩不稳定。文献[19]指出随着电机转速上升,定子阻抗增加,回路电流减小,输出转矩减小,为维持一定的

加速度,需要使直流电流维持在参考值。文献[20]对静止变频系统实现同步电机软启动和准同期并网进行了理论分析和现场实验,但现有研究缺乏对SFC全启动过程的控制和设计。

文中首先分析静止变频系统工作原理,低速阶段机端电压幅值小,容易受到干扰,根据电压测算出的转子转速不准确,传统的双闭环控制策略不能为同步电机提供稳定的电磁转矩。为了使电机启动初始阶段能以一定的加速度稳定加速,同时限制启动电流,提出整流电路触发角开环控制策略。由于低速阶段采用断续换相法,直流电流不稳定,文中提出逆变电路闭环控制方法,使直流电流快速上升并维持在参考值附近,相比于传统恒定逆变导通角控制方法,系统的动态性能更优。文中提出了低速和高速阶段控制器参数设计方法,提高SFC稳定性。最后,通过仿真验证所提控制策略及参数设计方法的正确性和有效性。

1 静止变频系统工作原理

同步电机静止变频系统如图1所示。主电路包括输入变压器、晶闸管整流电路、电流型逆变电路和同步电机;控制系统包括转子位置检测、同步相位检测、整流电路触发和电流型逆变电路触发。

将变压器漏感折算到变压器二次侧,变频器的交流和直流电压电流关系如式(1)所示。其中 U_i 为三相交流系统输入相电压有效值; U_{di} 为晶闸管整流电路输出直流电压有效值; U_{di} 为晶闸管逆变电路输入直流电压有效值; U_i 为三相交流输出相电压有效值,即同步电机机端电压; R_{dc} , L_{dc} 分别为电抗器 L_s 的

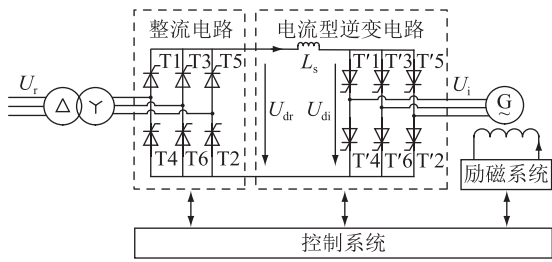


图1 静止变频系统

Fig.1 Static frequency conversion system

电阻和电感值; k 为变压器变比; α 为延迟触发角; μ_i 为换相重叠角。

$$\begin{cases} U_{dr} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} k U_r \cos\left(\alpha + \frac{\mu_i}{2}\right) \cos \frac{\mu_i}{2} \\ U_{dr} = R_{dc} i_{dc} + L_{dc} \frac{di_{dc}}{dt} + U_{di} \\ U_{di} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_i \cos\left(\beta - \frac{\mu_i}{2}\right) \cos \frac{\mu_i}{2} \end{cases} \quad (1)$$

电流型逆变电路换相过程如图2所示,在1个工作周期 T 内,每个桥臂的导通时间为 $T/3$,晶闸管的开通时刻依次间隔 $T/6$ 。

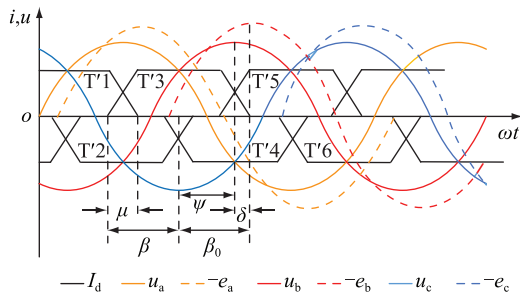


图2 电流型逆变电路换相过程

Fig.2 Commutation of current inverter circuit

同步电动机稳态相量见图3。由图3可知,同步电动机稳态运行时,电流相位超前电压相位,为电流型逆变电路提供晶闸管关断所需的反向电压。

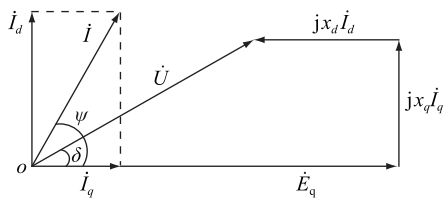


图3 同步电动机稳态相量

Fig.3 Steady state phasor of synchronous motor

对于三相同步电动机,其输出的电磁功率和转子运动方程为:

$$P_{em} = 3E_q I_c \cos\psi - 3I_d I_q (x_d - x_q) \quad (2)$$

$$T_{em} - T_l = J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r \quad (3)$$

式中: E_q 为励磁电压; P_{em} 为同步电动机的电磁功率; T_{em}, T_l 分别为同步电动机的电磁和机械转矩; J 为同步电动机转子的转动惯量; D 为同步电动机转子的摩擦系数; ω_r 为同步电动机转子的转速。

2 静止变频系统控制方法及参数设计

2.1 静止变频系统控制方法

静止变频系统后级电流型逆变电路的控制策略在同步电机启动过程中分为2个阶段,即低速阶段和高速阶段。低速阶段采用断续换相法将转子拖动到额定转速的10%,高速阶段采用自然换相法将转子拖动到额定转速的105%。电流型逆变电路的控制方法需要根据转子位置或电机反电动势相位确定导通信号,在任一时刻,电枢电流相位超前励磁电动势相位,避免启动过程中电机失步运行。

断续换流法是解决同步电机低速运行时机端电压较小、负载换相难的常用方法。为了最大限度提升转矩,初始导通设置 β_0 为 0° 。自然换相也称负载换相,其原理如图2所示。以a相反电动势最大为转子位置角起始参考值,高速阶段为防止电流型逆变电路发生换相失败,设置空载超前换流角 β_0 为 60° 。整个启动过程,电流型逆变电路导通策略如表1所示。

表1 电流型逆变电路导通策略

Table 1 Current inverter circuit conduction strategy

转子位置角/ $(^\circ)$	初始导通开关序列	高速阶段开关序列
0~60	T'1, T'2	T'2, T'3
60~120	T'2, T'3	T'3, T'4
120~180	T'3, T'4	T'4, T'5
180~240	T'4, T'5	T'5, T'6
240~300	T'5, T'6	T'6, T'1
300~360	T'6, T'1	T'1, T'2

若低速阶段采用速度外环、电流内环的双闭环控制整流电路的导通,由于同步电机转速与转速参考值相差较大,且直流电流不连续,会造成整流电路延迟触发角 α 大范围波动,稳定性较差。文中采用整流电路触发角开环控制, α 的初始值要满足系统输出的电磁转矩大于负载转矩,同时要限制直流电流,避免设备损坏。

$$I_{dmin} < \frac{2.34kU_r \cos\alpha_0}{R_{dc}} < I_{dmax} \quad (4)$$

式中: α_0 为整流电路初始导通角; I_{dmin} 为使同步电机转动的最小直流电流; I_{dmax} 为启动同步电机的限制电流。

随着转速上升,转子摩擦力矩增大。为了保证

转速稳定增加, SFC 需有足够的输出功率, 整流电路的输入功率应相应增大。

$$\frac{dP_{em}}{dt} = \frac{d(U_{dr}i_{dc})}{dt} = J \frac{d^2\omega_r}{dt^2} + D \frac{d\omega_r}{dt} \quad (5)$$

$$i_{dc} = \frac{U_{dr} - 2.34C_E\omega_r\Phi_1}{R_{dc}} \quad (6)$$

式中: C_E 为同步电机电动势常数; Φ_1 为每极磁通。

由式(5)、式(6)可得:

$$\frac{dcos\alpha}{dt} = \frac{J}{K_1} \times \frac{d^2\omega_r}{dt^2} + \frac{K_2}{K_1} \times \frac{d\omega_r}{dt} \quad (7)$$

$$K_1 = 2.34kU_r \left(i_{dc} + \frac{cos\alpha}{R_{dc}} \right) \quad (8)$$

$$K_2 = D + \frac{2.34C_E\Phi_1}{R_{dc}} \quad (9)$$

忽略式(7)中 ω_r 的二次项, 则 α 的余弦值与转速 ω_r 的关系式为:

$$\frac{dcos\alpha}{dt} = \frac{K_2}{K_1} \times \frac{d\omega_r}{dt} \quad (10)$$

高速阶段静止变频系统前级整流电路采用双闭环控制晶闸管的导通, 即速度外环和电流内环。速度外环实现在同步电机额定转速附近的大范围调速, 电流内环保证闭环调节的快速性, SFC 控制系统如图 4 所示。

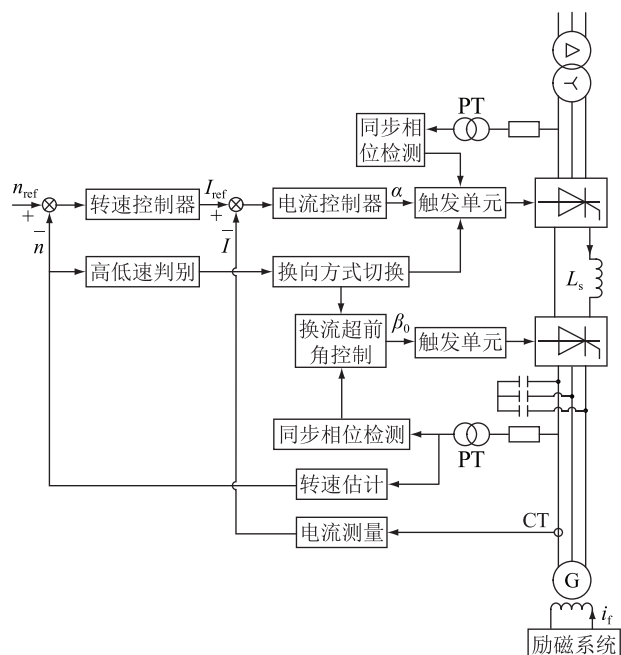


图 4 SFC 控制系统

Fig.4 SFC control system

2.2 SFC 控制器参数设计

2.2.1 低速阶段

整流电路在低速阶段采用开环控制, 为电机提

供充足的电磁转矩, 使转速按照设定的上升率稳定增加。低速阶段, 电流型逆变电路采用断续换相法, 直流电流不连续, 为了使直流电流快速上升且维持稳定, 电流型逆变器采用前馈和反馈控制相结合的方式, 对回路电流进行控制。

$$C(t) = C_{fw}(t) + C_{fb}(t) \quad (11)$$

式中: $C_{fw}(t)$ 为 t 时刻的前馈控制量; $C_{fb}(t)$ 为 t 时刻的反馈控制量。

$$C_{fw}(t) = C_{init} + t(K_{fwi}\Delta i_{upl}/\Delta T) \quad (12)$$

$$C_{fb}(t) = K_{fbp}\Delta i(t) \quad (13)$$

式中: C_{init} 为前馈控制量初始值, 一般取 0; K_{fwi} 为前馈控制器参数; Δi_{upl} 为控制器计算周期 ΔT 内电流变化量; K_{fbp} 为反馈控制器参数; $\Delta i(t)$ 为 t 时刻直流电流参考值与测量值的偏差。

根据控制指标要求确定断续换相法的持续时间 T_D ; 根据电流型逆变电路切换为自然换相法后的超前导通角确定 $C_{fw}(T_D)$, 通常情况取 60° ; 根据控制器的运算速度确定计算周期 ΔT , 在 $0.1 \sim 0.2$ p.u. 选取合适的前馈控制输入量 Δi_{pul} , 前馈控制器参数 K_{fwi} 为:

$$K_{fwi} = [C_{fw}(T_D) - C_{init}] \frac{\Delta T}{\Delta i_{upl} T} \quad (14)$$

根据启动同步电机的限制电流 I_{dmax} 及最大超前导通角 β_{max} , 确定反馈控制器参数 K_{fbp} 。

$$K_{fbp}I_{dmax} + C_{fw}(T_D) < \beta_{max} \quad (15)$$

2.2.2 高速阶段

高速阶段双闭环控制器通过控制机端电流 I 来控制电机转速 ω_r , 由式(2)、式(3)可得 I 和 ω_r 的关系为:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r = (C_M I - C_R I^2) - T_1 \quad (16)$$

式中: C_M, C_R 与电机运行状态有关。

在系统稳态运行点, 使用线性化方法提取同步电机的小信号模型。

$$J \frac{d(\omega_r + \Delta\omega_r)}{dt} + D(\omega_r + \Delta\omega_r) = [C_M(I + \Delta I) - C_R(I + \Delta I)^2] - T_1 \quad (17)$$

$$\frac{\Delta\omega_r(s)}{\Delta I(s)} = \frac{C_M - 2C_R I}{Js + D} \quad (18)$$

对直流回路进行小信号分析, 忽略 ω_r 的变化, 得到输入直流电压和直流电流关系为:

$$L_{dc} \frac{d(I_{dc} + \Delta I_{dc})}{dt} + R_{dc}(I_{dc} + \Delta I_{dc}) = U_{dr} + \Delta U_{dr} - \frac{3\sqrt{6}}{2\pi} C_E (\omega_r + \Delta\omega_r) \quad (19)$$

$$\frac{\Delta I_{dc}(s)}{\Delta U_{dr}(s)} = \frac{1}{sL_{dc} + R_{dc}} \quad (20)$$

式(17)一式(20)中: $\Delta\omega_r, \Delta I, \Delta I_{dc}, \Delta U_{dr}$ 分别为系统状态量 $\omega_r, I, I_{dc}, U_{dr}$ 的扰动量。

据此可以得到静止变频控制系统的传递函数,如图5所示。

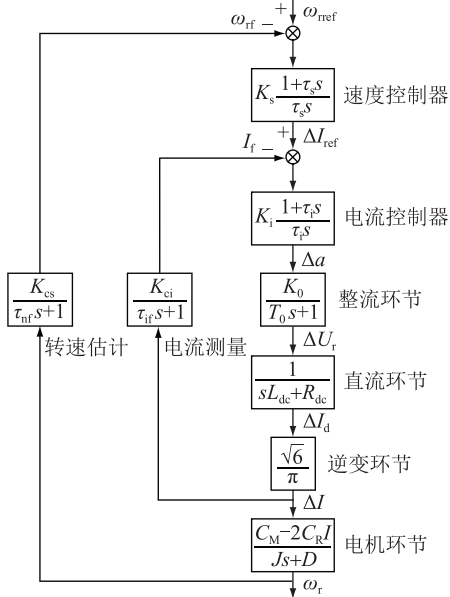


图5 静止变频控制系统传递函数

Fig.5 Transfer function of static frequency converter control system

首先考虑电流内环开环传递函数 $G_{op}(s)$,其由整流电路传递函数 $G_i(s)$ 、电流反馈网络传递 $H_{if}(s)$ 和电流补偿网络 $C_i(s)$ 组成。

$$G_{op} = G_i(s)C_i(s)H_{if}(s) \quad (21)$$

考虑整流电路触发信号的延迟,其传递函数为:

$$G_i(s) = \frac{U_r(s)}{\alpha(s)} = \frac{K_0}{T_0 s + 1} \quad (22)$$

电流反馈网络的传递函数可以表示为一阶惯性环节。

$$H_{if}(s) = \frac{K_{ci}}{\tau_{if} s + 1} \quad (23)$$

式中: K_{ci} 为电流传感器增益; τ_{if} 为电流传感器时间常数。

电流补偿网络的设计应满足:

(1) 在所有可能的操作条件下,电流闭环驱动系统稳定;

(2) 定子电流快速响应电流参考指令的变化或其他扰动,同时超调量小,阻尼量小;

(3) 稳态误差在参考电流变化时很小或为0。

在提高系统稳态性能的同时,采用比例积分(PI)控制器来改善系统的动态响应。PI控制器的

传递函数为:

$$C_i(s) = K_i \left(1 + \frac{1}{\tau_i s} \right) \quad (24)$$

式中: K_i, τ_i 分别为PI控制器的增益和时间常数。

经典控制理论提出开环传递函数在穿越频率 ω_c 处应有单位增益和一定的相位裕度 φ_m ,即:

$$\begin{cases} \arg(G_{op}(j\omega_c)) = -\pi + \varphi_m \\ |G_{op}(j\omega_c)| = 1 \end{cases} \quad (25)$$

将式(21)一式(24)及其参数值代入式(25),求得 ω_c, K_i, τ_i 。

其次考虑转速外环,用于电机速度控制的速度外环包括电流内环闭环传递函数、同步电机传递函数、转速估计环节和速度补偿器。转速估计环节可用一阶惯性环节表示, K_{cs} 为转速估计环节的增益, τ_{if} 为转速估计环节的时间常数。速度补偿器用于调整系统性能以满足设计要求,速度补偿器同样采用PI控制器。 K_s, τ_s 分别为PI控制器的增益和时间常数,其参数设计方法与电流内环参数设计方法相同。

3 仿真验证

在Matlab/Simulink中搭建仿真模型,同步电机参数采用文献[19]中的潘家口水电站机组参数,具体如表2所示。直流电抗器的电感值为500 mH,输入三相电压线电压有效值为22 kV,励磁电压为恒定100 V。

表2 潘家口水电站机组参数

Table 2 Unit parameters of Panjiakou hydropower station

同步电机参数名	参数值
额定功率/MW	90.2
额定功率因数	1
额定电压/kV	13.8
额定电流/A	4 088
额定频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	142.8
额定励磁电压/V	215
额定励磁电流/A	1 377
转子极对数	21

传统、改进型控制策略启动过程的转子转速 ω_r 及位置 θ 如图6所示。图6(a)中,在SFC作用下,转子转速从0被拖动到额定转速的105%,低速阶段持续时间为0.2 s,启动时间约为3.2 s。图6(b)中,低速阶段持续时间为0.2 s,启动时间约为3.3 s,整个启动过程转速上升接近于线性,从低速阶段过渡到高速阶段,加速度变化较小,近似于软切换。对

比2种控制策略,改进型控制策略对于同步电机静止变频启动更具优势。

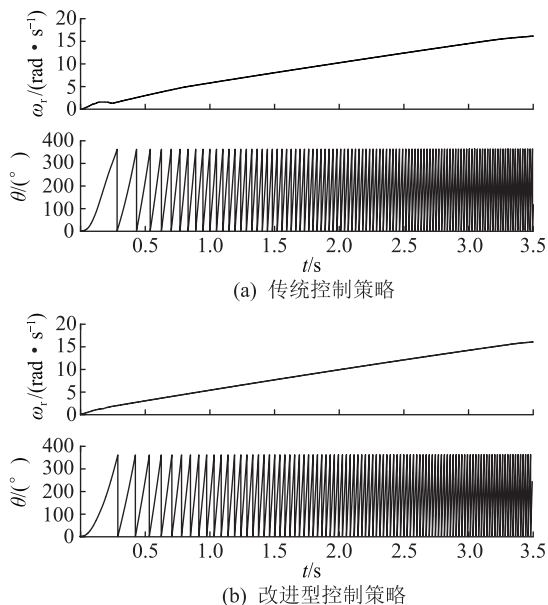


图6 启动过程转子转速及位置

Fig.6 Rotor speed and position during startup

启动过程直流电流波形如图7所示,在低速和高速阶段直流电流都维持在参考值附近,未出现随着转速上升直流电流不能跟随参考值的现象。在低速阶段脉冲换相时,直流电流先减小为0,而后直流电流快速上升,有利于提高系统换相成功率 and 稳定性。

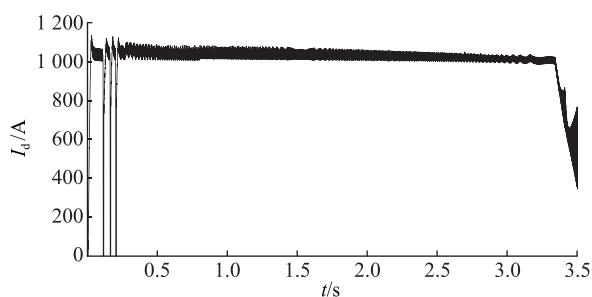


图7 启动过程直流电流

Fig.7 Direct current during start-up

低速、高速阶段机端三相电压电流如图8所示。图8(a)中,低速阶段转速较低,机端电压非常小,在换相期间会导致机端电压产生脉冲,损坏电机绝缘。图8(b)中,定子三相电压幅值随着转速上升而增大,高速阶段采用自然换相法,换相期间机端电压不会产生脉冲而是产生凹陷,相较于脉冲换相阶段,转速上升率有所降低,原因是为了防止换相失败,增大了超前导通角,导致电磁转矩有所下降。整个启动过程,电机转速平稳上升,未产生冲击电流,系统的动态性能良好。

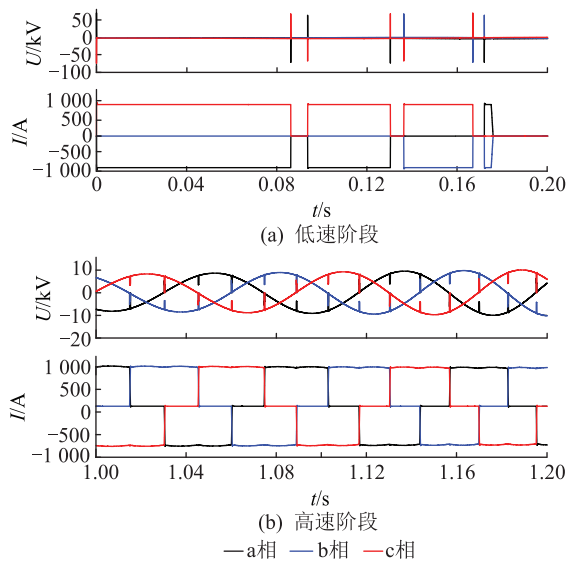


图8 机端三相电压电流

Fig.8 Three-phase terminal voltage and current

3 结语

文中从静止变频系统的基本原理出发,阐述了电流型逆变器和抽水蓄能机组配合实现负载换相的方法。同时提出了一种改进型SFC控制方法,包含低速和高速阶段控制方法,提高了SFC稳定性。进一步对静止变频系统控制器进行了参数设计,提升了SFC的动态性能。

SFC能够实现抽水蓄能机组启动、调速和并网等一系列自动化控制,是抽水蓄能电站的关键设备。SFC工作时,在电网侧产生大量谐波,对电网造成不利影响,因此谐波抑制技术是未来SFC研究的重要内容。

本文得到南方电网科学研究院有限责任公司科技项目(ZBKJXM20180183)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 叶瑞丽. 可再生能源电网储纳运行策略研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.
 YE Ruili. Research on storage-operation strategy in renewable energy grid[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
 [2] LI Jinxia, ZHENG Jinghong, ZHU Shouzheng, et al. Study on impact of grid connection of distributed photovoltaic system on distribution network peak-valley difference considering photovoltaic volatility [C]//China International Conference on Electricity Distribution. 2012:1-4.
 [3] 武磊, 李诚帅, 方书博, 等. 抽水蓄能机组高-低-高变频启动控制策略研究[J]. 水力发电, 2020, 46(2): 66-70.
 WU Lei, LI Chengshuai, FANG Shubo, et al. Research on control strategies of high-low-high variable-frequency startup for pumped storage units[J]. Water Power, 2020, 46(2): 66-70.
 [4] FORCOS A, MARINESCU C, TEODORESCU R, et al. Efficient

- cy improvement for wind energy pumped storage systems[C]//IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2011: 579-584.
- [5] 严伟. 抽水蓄能机组静止变频器(SFC)关键技术研究[C]//中国水力发电工程学会电网调峰与抽水蓄能专业委员会. 2019:179-185.
- YAN Wei. Study on key technology of static frequency converter (SFC) of pumped storage unit [C]//China Hydraulic Power Engineering Society and Power Network Peak Regulation and Pumped Storage Committee. 2019:179-185.
- [6] ROY T K, MAHMUD M A, OO A M T. Robust adaptive back-stepping excitation controller design for higher-order models of synchronous generators in multimachine power systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 34(1):40-51.
- [7] 孙平, 张娜, 马登清. 电源扩展优化模型在抽水蓄能电站合理运行中的应用[J]. 水力发电, 2018, 44(3):70-73.
- SUN Ping, ZHANG Na, MA Dengqing. Application of power source expansion optimization model in the rational operation of pumped-storage power stations[J]. Water Power, 2018, 44(3):70-73.
- [8] 马实一, 李建成, 段聪, 等. 基于电力市场背景的风-光-抽水蓄能联合优化运行[J]. 智慧电力, 2019, 47(8):43-49.
- MA Shiyi, LI Jiancheng, DUAN Cong, et al. Joint operation optimization of wind-photovoltaic-pumped hydro storage based on electricity market[J]. Smart Power, 2019, 47(8):43-49.
- [9] 汤天喜. 静止变频器在抽水蓄能电站调节的应用[J]. 电力电子技术, 2011, 45(7):101-102.
- TANG Tianxi. The application of SFC to the response of pumped storage power station [J]. Power Electronics, 2011, 45(7):101-102.
- [10] ZHENG Tao, JIANG Xue, YU Shuo. The simulation of the static frequency converter in pumped storage power plant [C]//5th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power. 2015:318-323.
- [11] 胡静, 朱振飞, 朱英英, 等. 基于静止变频装置启动燃气轮机机组的建模及仿真[J]. 电力科学与技术学报, 2013, 28(1):92-97.
- HU Jing, ZHU Zhenfei, ZHU Yingying, et al. Modeling and simulation of starting up gas turbine generator unit using static frequency converter[J]. Journal of Electric Power and Technology, 2013, 28(1):92-97.
- [12] 石祥建, 牟伟, 韩焦, 等. 大型同步调相机控制策略研究[J]. 中国电力, 2017, 50(12):44-50.
- SHI Xiangjian, MOU Wei, HAN Jiao, et al. Research on control strategy of large synchronous condenser [J]. Electric Power, 2017, 50(12):44-50.
- [13] 王德顺, 杨波, 李官军, 等. 抽水蓄能机组无位置传感器静止变频器启动控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23):114-119.
- WANG Deshun, YANG Bo, LI Guanjun, et al. A control strategy of static frequency converter start-up for pumped-storage power plants without position sensors[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23):114-119.
- [14] 石祥建, 徐峰, 闫伟, 等. 抽水蓄能电站静止变频器综述[J]. 水电与抽水蓄能, 2019, 5(6):87-92.
- SHI Xiangjian, XU Feng, YAN Wei, et al. Summary of static frequency converter in pumped storage power station [J]. Hydropower and Pumped Storage, 2019, 5(6):87-92.
- [15] 何雄开. 大型抽水蓄能机组的静止变频起动研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2006.
- HE Xiongkai. Research of static frequency converter starting in large capacity pumped-storage units [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2006.
- [16] 王茜茜. 大型同步电机静止变频器软起动控制系统研究[D]. 武汉:华中科技大学, 2013.
- WANG Qianqian. Research on static frequency converter soft-starting control system for large synchronous motors [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [17] WANG Puyu, LIU Xing, MOU Qingwen, et al. Start-up control and grid integration characteristics of 300 Mvar synchronous condenser with voltage sourced converter-based SFC [J]. IEEE Access, 2019, 7:176921-176934.
- [18] WANG Deshun, ZHANG Lichun, YANG Bo, et al. Developing and simulation research of the control model and control strategy of static frequency converter [C]//Second International Conference on Intelligent System Design and Engineering Application. 2012:1032-1035.
- [19] 石祥建, 司红建, 闫伟, 等. 静止变频器系统变压器短路阻抗的算法研究[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(4):53-55.
- SHI Xiangjian, SI Hongjian, YAN Wei, et al. Algorithm study of system transformer short circuit impedance in static frequency converter [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2013, 32(4):53-55.
- [20] 杨旭, 荣万里. 基于 LCI 的大功率同步电机自控变频软启动控制技术研究[J]. 电气传动, 2016, 46(6):80-85.
- YANG Xu, RONG Wanli. Device and control technology of self-controlled soft start with variable frequency for high-power synchronous motor based on LCI [J]. Electric Drive, 2016, 46(6):80-85.

作者简介:



黄东启

黄东启(1984),男,硕士,工程师,从事电力系统规划设计工作(E-mail:1434482892@qq.com);

单学彪(1967),男,硕士,工程师,从事电气设备成套技术工作;

何嘉希(1989),男,博士,工程师,从事发机电磁设计工作。

Start-up control strategy of static frequency converter in stages

HUANG Dongqi, SHAN Xuebiao, HE Jiayi, LIANG Chao, JI Zhenon

(China Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: As the main starting mode of pumped storage unit, the static frequency conversion starting mode has the advantages of controllable starting current, frequent starting and wide speed regulating range. When the rotor is in low speed state, the speed calculated according to the terminal voltage is not accurate. So the output electromagnetic torque error is large with the traditional control method. Firstly, the working principle of the static frequency converter system of synchronous motor is introduced. Then an improved control method of the static frequency converter(SFC) is put forward. In the low-speed phase, the open-loop control of the trigger delay angle is adopted in the rectifier circuit, so that the SFC can continuously provide sufficient acceleration torque, and the rotor can rise according to a certain acceleration. Feedforward and feedback control are adopted in the inverter circuit to make the direct current(DC) current rise rapidly and maintain at a certain level. In the high-speed phase, the double closed-loop control rectifier circuit is used to trigger the delay angle, and the inverter circuit uses the load commutation method to realize the commutation. The parameter design method of the closed-loop controller is also given, which improves the stability of the DC loop and the dynamic performance of the static inverter system. Finally, the correctness and effectiveness of the control strategy are verified by simulation.

Keywords: static frequency converter(SFC); synchronous motor starting; rectifier control; inverter control; the reversing method

(编辑 吴楠)

(上接第 176 页)

Fault diagnosis method for secondary system of smart substation based on PSO-SVM

YUAN Mingzhe¹, ZOU Jinxin¹, WANG Gen², LI Xuekai¹, WEI Jiaqi¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Company Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, China;

2. College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: In order to make full use of the information of the intelligent substation, help the operation and maintenance personnel to locate the faults of the secondary system of the intelligent substation more quickly and accurately, so as to ensure the safe and stable operation of the power system, a fault diagnosis method for secondary system of intelligent substation based on multi classification support vector machine(SVM) is proposed, and particle swarm optimization(PSO) algorithm is used to optimize the parameters automatically. The expert database is built according to the historical state data of the long-term operation of the intelligent substation and the processing results of the maintenance personnel. The original signal of the secondary system of the intelligent substation is a large number of $\{0,1\}$ state variables. The data group is defined in the form of switching value coding, and the data dimension of the signal is reduced by using the principal component analysis method. Finally, the fault diagnosis model of the secondary system of the intelligent substation based on the information of the terminal is constructed. The results of the comparison between the diagnosis model and the expert manual judgment show that the method proposed has excellent accuracy and applicability.

Keywords: smart substation; secondary system; fault diagnosis; expert database; principal component analysis; support vector machine(SVM)

(编辑 钱悦)