

基于SPLL技术的VSC-HVDC系统中相位检测的研究

对于电力系统运行过程中经常会出现功率波动问题,使锁相环相位检测功能明显受到干扰,甚至造成误判断。在通过改进经典锁相环(PLL)技术的基础上,设计了一种软锁相环(SPLL)技术,通过仿真发现,该技术可以有效降低系统谐波的影响,准确判断出系统相位,维持VSC-HVDC高压直流输电系统的稳定运行。

向 彬¹ 邵 伟² 毛晓坡¹/1.国网湖北省电力有限公司电力科学研究院
2.国网江苏省电力有限公司检修分公司

0 引言

随着电力电子控制技术的不断进步,柔性高压直流输电技术主要采用电压源换流器(Voltage Source Converter, VSC)与脉冲宽度调制(Pulse Width Modulation, PWM)两种技术^[1-2]。因为VSC-HVDC输电系统的优点是没有使用无功功率,而是分别操作有功功率与无功功率给无源系统提供电能。这种优势使得其完全适用于城市配电网系统建设、异步电网间交易和新能源发电等场合^[3-4]。

对于VSC-HVDC输电系统,如果进行坐标变换、产生IGBT的触发脉冲和设置控制环的参数等操作,其前提为准确分析判断得到交流电网的基准相位,为此,一般需要经由锁相环(Phase Locked Loop, PLL)进行相位的检测,于是锁相环成为决定VSC-HVDC输电系统优劣的关键器件^[5]。当VSC-HVDC输电系统工作时,整个系统由于外部干扰的影响,使得其难以维持50 Hz的工作频率;而且系统中由于存在谐波作用,降低了PLL分析判断结

果;加上系统中存在高频电力电子器件,进一步降低了PLL的性能。于是,为了更好地分析实际电网的工作情况,PLL如何更好地分析判断系统工作频率,成为VSC-HVDC输电系统中难题之一。

本文使用软锁相环(Software Phase Locked Loop, SPLL)技术,通过恰当地设置控制参数,有效降低了系统频率波动和谐波的干扰,能够快速进行相位同步,从而稳定系统的运行。

1 经典PLL技术

目前,经典PLL技术检测相位有两种方法:过零检测法和基于Clark变换检测法。前者分析系统前后两次电压为零的时间差,得到系统的频率与相位,原理简单,然而由于系统的基波频率远小于IGBT工作频率,而且系统电压出现故障时,均会导致该技术难以检测系统的相位。后者通过Clark变换,变换前后电压幅值相同, α 轴相位和a轴的电压相位一样, β 轴相位超前 α 轴相位 90° ,则有

$$\begin{cases} u_{sa} = U_m \cos \theta \\ u_{sb} = U_m \cos(\theta - 2\pi/3) \\ u_{sc} = U_m \cos(\theta + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

Clark变换为

$$\begin{pmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{pmatrix} = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{pmatrix} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)中,得



向 彬/工程师

关键词/Keywords

功率波动·
相位检测·
软锁相环·
谐波·
高压直流输电·

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = U_m \cos \theta \\ u_{s\beta} = U_m \sin \theta \end{cases} \quad (3)$$

在系统存在谐波的情况下,难以准确判断出系统相位,于是需要重新设计滤波器,因为滤波器增加了分析判断的时间,导致相位判断滞后。特别是当系统存在电压失衡的情况时,令此时三相电压为

$$\begin{cases} u_{sa} = U_m \cos \theta \\ u_{sb} = U_m(1+\beta) \cos(\theta-2\pi/3) \\ u_{sc} = U_m(1+\gamma) \cos(\theta+2\pi/3) \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(2)中得

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = U_m \cos \theta + U_m \left(\frac{\gamma-\beta}{2\sqrt{3}} \sin \theta + \frac{\beta+\gamma}{6} \cos \theta \right) \\ u_{s\beta} = U_m \sin \theta + U_m \left(\frac{\beta+\gamma}{2} \sin \theta + \frac{\gamma-\beta}{2\sqrt{3}} \cos \theta \right) \end{cases} \quad (5)$$

通过式(5)可知,当三相电压失衡情况比较严重时,电压幅值 $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 不一样,而且相位差也不是 90° 。因此该方法不适合VSC-HVDC输电系统。

2 SPLL技术

SPLL采用 dq 变换技术,实现三相电压在 d 轴或者 q 轴的相位同步。令软锁相环的输出角为 $\hat{\theta}$, dq 变换公式为

$$\begin{pmatrix} f_d \\ f_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{pmatrix} \begin{pmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{pmatrix} \quad (6)$$

将式(3)代入到式(6)有

$$\begin{cases} u_{sd} = U_m \cos(\theta - \hat{\theta}) \\ u_{sq} = U_m \sin(\theta - \hat{\theta}) \end{cases} \quad (7)$$

通过式(7)可知,如果 $\theta = \hat{\theta}$,那么软锁相环的输出角 $\hat{\theta}$ 和电网侧A相同步,则, $u_{sd} = U_m$, $u_{sq} = 0$ 。于是,仅使 q 轴上的电压等于零,即能保证相位同步,软锁相环的工作电路原理如图1所示。

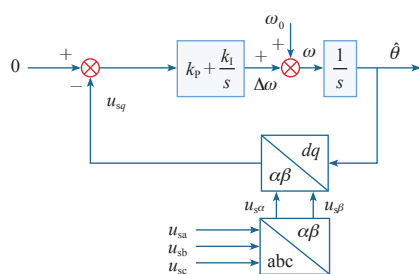


图1 软锁相环的工作电路原理

通常Clark变换与 dq 变换作用是锁相环中的鉴相功能,PI调节器与积分器起的作用是滤波,能够消除 u_{sq} 中的一些谐波,改善了检测的效果。恰当地对PI控制器的参数进行设置,能够进一步提高相位的检测速度。其同步相位检测电路如图2所示。

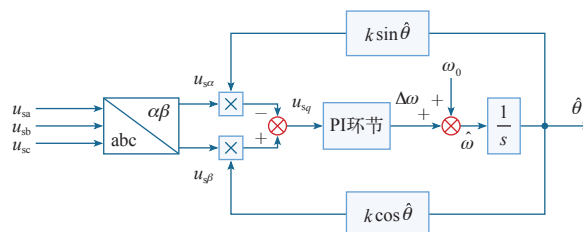


图2 SPLL同步相位检测电路原理

令系统中电网侧A相相位角 $\theta = \omega_0 t + \theta_1$,SPLL的输出角 $\hat{\theta} = \omega_0 t + \theta_2$,通过图2可知 u_{sq} 表达式为

$$\begin{aligned} u_{sq} &= k u_{s\beta} \cos(\omega_0 t + \theta_2) - k u_{s\alpha} \sin(\omega_0 t + \theta_2) \\ &= k U_m \sin(\omega_0 t + \theta_1) \cos(\omega_0 t + \theta_2) - \\ &\quad k U_m \cos(\omega_0 t + \theta_1) \sin(\omega_0 t + \theta_2) \\ &= k U_m \sin(\theta_1 - \theta_2) \end{aligned} \quad (8)$$

如果SPLL检测到系统相位,且 $\theta \approx \hat{\theta}$,则

$$u_{sq} = k U_m \sin(\theta_1 - \theta_2) \approx k U_m(\theta_1 - \theta_2) \quad (9)$$

式(9)经由线性化处理,那么SPLL频域下的结构框图如图3所示。

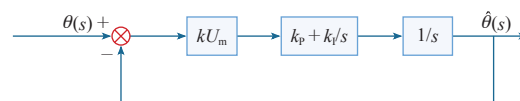


图3 SPLL频域下的结构框图

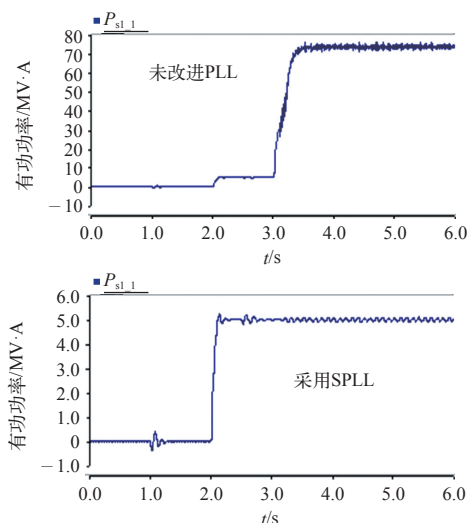
则相位角的传递函数有

$$\frac{\hat{\theta}(s)}{\theta(s)} = \frac{k U_m (k_p s + k_i)}{s^2 + U_m k k_p s + U_m k k_i} = \frac{2\zeta \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta \omega_n s + \omega_n^2} \quad (10)$$

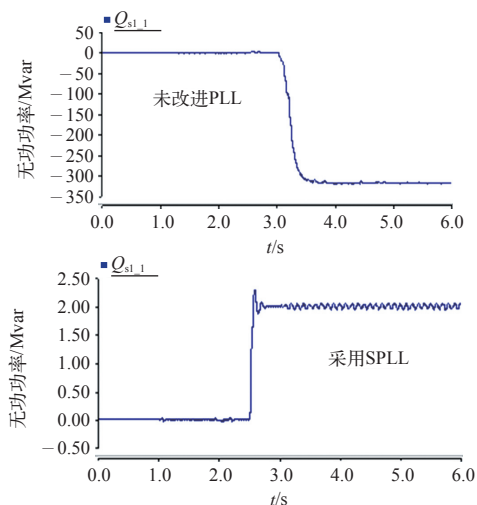
3 仿真分析

当由于外部出现扰动引起系统频率出现很大变化时,令阻尼系数 $\zeta = 0.707$,PI控制器中的比例器 $k_p = 28.5$,积分器 $k_i = 3\ 700$ 。交流系统功率为 $100\text{ MV}\cdot\text{A}$,交流线电压峰值为 110 kV ,频率为 50 Hz ;直流电压为 20 kV ,逆变侧无功功率为 -2 Mvar ,整流侧的有功功率为 5 MW ,无功功率为 2 Mvar ;整流侧有功 2 s 调控,无功 2.5 s 调

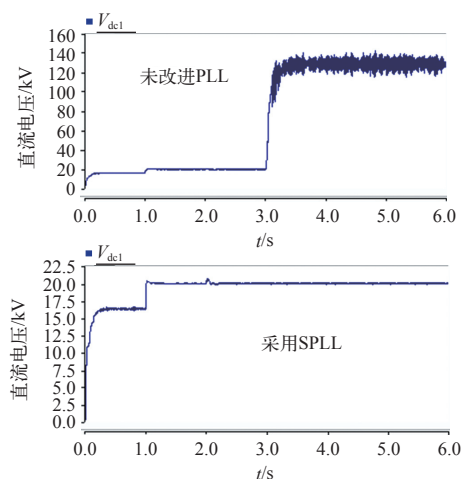
控;直流侧电压1 s调控,无功2 s调控。频率突变时,PLL改进前后系统动态响应波形比较如图4所示,图中SPLL在系统的3 s出现频率由基准频率变



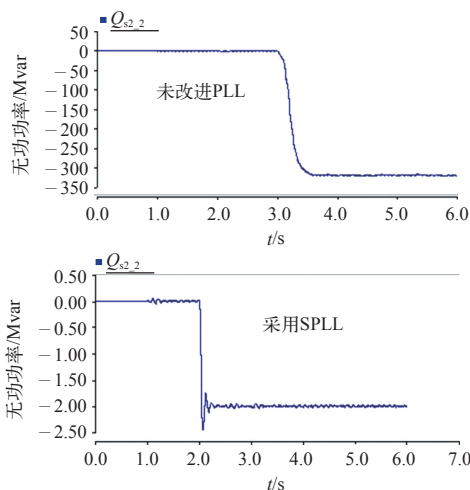
(a) 整流侧有功功率波形的比较



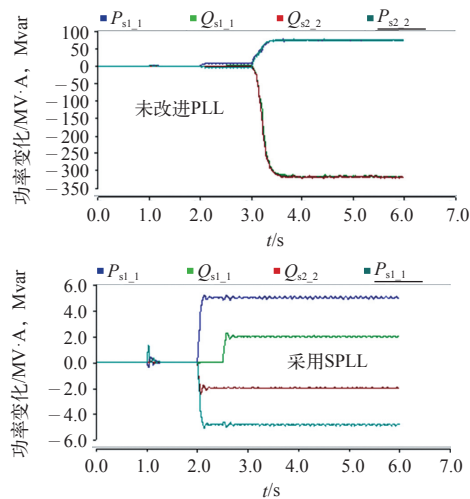
(b) 整流侧无功功率波形的比较



(c) 直流电压波形的比较



(d) 逆变侧无功功率波形的比较



(e) 整流侧和逆变侧功率波形的比较

图4 频率突变时,PLL改进前后系统动态响应波形比较

成60 Hz情况。

通过图4可知,如果频率出现变化,使用经典的PLL技术3 s后,系统有功功率约为75 MV·A;使用SPLL技术3 s后,系统有功功率虽然出现一些波动,但依然维持在设计值5 MV·A。对于无功功率,使用PLL技术2.5 s后,系统变为-317 Mvar;使用SPLL技术2.5 s后,系统无功基本处于2 Mvar。对于直流电压使用PLL技术,电压波动非常大,最大值接近140 kV;使用SPLL技术,系统电压基本维持在20 kV。对于逆变侧无功功率,使用经典PLL技术,迅速降低到-320 Mvar;使用SPLL技术约2 s后,系统无功维持在-2 Mvar。因此,通过对比可知,使用SPLL技术能够降低系统由于干扰而出现

(下转第39页)

- 障[J]. 低碳世界, 2015(29): 44-45.
- [2] 芦宇峰, 孟大伟, 等. SF₆高压断路器智能化操动机构的研究与优化[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(7): 94-98.
- [3] 史可鉴, 林莘, 等. 550 kV GIS隔离开关调速电机操动机构的研制[J]. 高电压技术, 2015, 41(6): 1981-1988.
- [4] 林莘. 现代高压电器技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011.
- [5] 林莘, 马跃乾, 徐建源. 高压断路器新型操动机构电机设计分析[J]. 沈阳工业大学学报, 2008, 30(2): 129-133.
- [6] 刘爱民, 林莘. 断路器操动机构用直线感应电机的优化设计[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 528-532, 540.
- [7] 李昊旻, 林莘, 徐建源. 126 kV真空断路器永磁摆角电机操动机构的设计与动态特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1664-1669.
- [8] 杨涛, 黄瑜琰, 李大卫, 等. 高压断路器电机操动机构技术的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2010, 50(4): 521-524.
- [9] 卢伟, 孟焯, 孙以泽, 等. 基于Modbus/TCP及FINS/TCP协议的数据采集与通信系统设计[J]. 仪表技术与传感器, 2017(1): 88-91.
- [10] 卢文俊, 冷杉, 杨建军. 基于Modbus协议的控制装置远程监控系统[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 54-56.
- [11] 张凡, 朱永利, 熊海军, 等. Modbus到IEC 61850-8-1映射方法及其在状态监测中的应用[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 84-88.
- [12] 张海源, 任春梅, 张冉. Modbus协议在电力系统中的应用[J]. 继电器, 2007, 35(17): 31-34.
- [13] 孙静, 秦世引, 宋永华. 模糊PETRI网在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 74-79.
- [14] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 98-103.
- [15] 苏鹏声, 王欢. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(1): 61-65.

(收稿日期: 2018-02-02) EA

(上接第34页)

的谐波作用, 改善了系统稳定运行的工作性能。

4 结束语

本文通过使用SPLL技术, 有效解决了电力系统中由于频率波动出现相位检测困难的问题。

1) 通过仿真发现, SPLL技术在整流侧有功功率、无功功率、直流电压波形和逆变侧无功功率等方面均可以使系统调节至稳定运行状态。

2) 该技术能够消除谐波影响, 快速完成相位检测工作, 性能明显优于经典PLL技术。

由于本文仿真模型建立的前提是交流侧电压平衡, 而实际交流系统难以达到时刻平衡, 影响了系统控制器的工作, 需要进行进一步的研究。

参考文献

- [1] Mike Barnes, Antony Beddard. Voltage source

converter HVDC links – the state of the art and issues going forward [J]. Energy Procedia, 2012, 24: 108-122.

- [2] 张文亮, 汤广福, 贺之渊. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1-7.
- [3] Jacobson B, Jiang-hafner Y, Rey P, et al. HVDC with voltage source converters and extruded cables for up to ± 300 kV and 1 000 MW [C]. CIGRE Session, 2006: B4-105.
- [4] 胡兆庆, 毛承雄, 陆继明. 一种新型的直流输电技术——HVDC Light [J]. 电工技术学报, 2005, 20(5): 1-5.
- [5] Ronström L, Hoffstein M L. The estlink HVDC Light® transmission system [C]. Security and Reliability of Electric Power Systmes, 2007: 1-7.

(收稿日期: 2017-08-08) EA