

# 高压直流换流变一次通流试验方法的研究及应用

李鹏,袁宇波,黄浩声,张佳敏,高磊

(江苏省电力公司电力科学研究院,江苏南京 211103)

**摘要:**在高压直流换流变保护调试中,确定其套管电流互感器(TA)极性及其二次回路正确性是一项较困难和复杂的工作。文中结合实际工程应用,提出了采用直流和交流一次通流校验换流变套管TA二次回路的方法。在介绍互感器同名端和极性的基础上,分析了利用直流和交流一次通流检查TA二次回路的原理;给出了换流变套管TA二次回路检查的一次通流方法及其现场应用的关键问题和完整实现方案。利用政平站换流变保护改造调试,将文中的直流和交流一次通流方法应用于实际工作,检查换流变保护相关二次电流回路极性及接线等的正确性和完整性,现场启动试验的带负荷测试验证了此方案的有效性。

**关键词:**高压直流换流变;TA二次回路;一次通流试验;换流变保护

**中图分类号:**TM77

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2012)06-0026-05

变电站二次系统规模庞大,保护配置与电流互感器(TA)二次回路比较复杂,在试验中常发生TA极性接错等问题,对调试进度和质量造成很大影响。变电站二次系统现场调试中,通常采用回路查线和测量回路电阻的方法校验TA二次回路的正确性<sup>[1]</sup>。常规的检测方法利用测试回路电阻等手段能保证二次回路的连通性等基本要求,但对于电缆接地或有寄生回路产生分流、TA极性不确定等问题无法可靠检测,可能造成启动调试工作的被动。

一次通流是检查二次回路的一个重要环节,其主要目的是为检验变电站TA变比和校验线路差动、母线差动、短引线、主变差动等保护用TA及测量、计量用TA接线的正确性<sup>[1,2]</sup>。通过一次通流的整组试验检验TA二次回路是很有意义的。高压直流换流站中,换流变是重要的一次设备,占换流站总投资的很大部分。换流变保护(CTP)主要由差动保护构成,而换流变各侧TA变比不尽相同,且有一侧为三角形接法。为保证TA二次回路极性、变比、相序的正确性,在换流站启动试验前对主变进行一次通流是有必要的<sup>[1,3-6]</sup>。

## 1 TA同名端及极性

传统TA与变压器结构类似,按变压器原理工作,一次侧和二次侧通过同一个磁通链路进行能量的传递和电流/电压大小的转换。TA同名端定义为在同一交变磁通作用下,在任何瞬间各绕组具有相同的电动势极性(方向)的端子<sup>[7,8]</sup>。TA绕组极性是其原副边绕组感应电势之间的相位关系,极性判别属于同名端问题。对于一台TA,原副边绕组在同一交变磁通的作用下同时产生感应电势,感应电动势方向判别基于以下原理:(1)根据楞次定律,绕

组中的电动势力图产生一个与原磁通方向相反的磁通以阻止原磁通的增加;(2)感应电动势的方向与其力图产生的磁通方向满足右手螺旋定则。

同名端具有以下特点:(1)原幅边绕组同名端通入方向相同的电流时,在铁心中产生的磁通方向一致;(2)当从一次绕组的极性端通入电流时,二次绕组回路中感应出的电流从极性端流出,以极性端为参考,一、二次电流方向相反,因此也称为减极性标注。

TA同名端或极性的识别方法一般基于TA工作原理和同名端的定义及特点,利用试验来检测,常用的方法有直流法和交流法。

## 2 换流变套管TA极性测试的直流法

### 2.1 直流法原理

TA一、二次侧各有2个引出端,利用直流法进行极性校验其实就是校验一、二次侧的相对极性。直流法极性检测中,先假设TA极性,并将TA一次引出端与干电池相连,其假设的一次侧正极性与电池正极相连;TA二次侧接直流指示表(mA表),将假设的二次侧正极性端接直流指示表的正接线柱;通过开关K控制电流的通断。测试原理接线如图1所示,其中干电池为6~9V的电池组,直流指示表为高灵敏度的双向直流电流表。

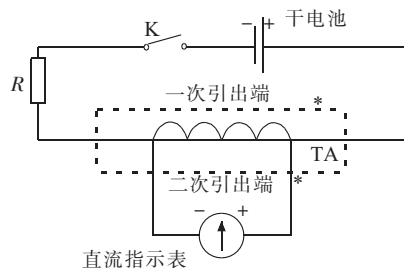


图1 直流法TA极性校验结构图

直流法工作原理如下:开关 K 闭合时,在 TA 一次产生阶跃电压,TA 磁路中产生一个快速上升然后不变的磁通,二次侧由此感应出上升后立刻衰减的电流;开关 K 打开时,互感器磁路中的磁通快速衰减,二次侧感应出反向的磁通,从而感应出反向的电流。因此,闭合/打开开关 K,通过观察直流指示表的指针偏转方向可以判断 TA 的极性,如开关 K 闭合时,若指示表指针偏向正方向,则假设极性正确;若指针偏向负方向,则假设极性相反。

## 2.2 换流变套管 TA 极性测试方法

换流变套管 TA 安装完成之后,TA 的非极性端在变压器内部,无法按图 1 的方式用干电池在 TA 一次侧两端直接加电压进行极性测试。由于 TA 一次侧串接在变压器回路中,可采用在变压器回路中通入直流电流的方法进行套管 TA 极性测试。

对于单相双绕组变压器,直流一次通流测试套管 TA 极性的试验原理即相应等值电路如图 2 所示。其中,Ⅰ侧、Ⅱ侧分别指换流变网侧和阀侧。若换流变 Ⅱ 侧开路,等值回路阻抗主要由变压器励磁阻抗组成,阻抗值很大。由于回路电感很大,在 Ⅰ 侧加 6~9 V 的阶跃直流电压,TA 一次电流上升很缓慢,TA 二次侧基本无感应电流输出,回路中 mA 表偏转非常小,难以准确判断 TA 极性。若将换流变 Ⅱ 侧短接,则回路阻抗主要由变压器 Ⅰ 侧、Ⅱ 侧漏抗组成,阻抗很小,在 Ⅰ 侧加阶跃直流电压时,回路电流变化很剧烈,TA 二次侧感应电流较大, mA 表偏转很明显。因此,试验时首先需将变压器 Ⅱ 侧短接,然后在 Ⅰ 侧加阶跃电压,并用 mA 表偏转来检测各套管 TA 的极性。直流法试验可能使变压器铁心产生剩磁,因此试验后应进行去磁。

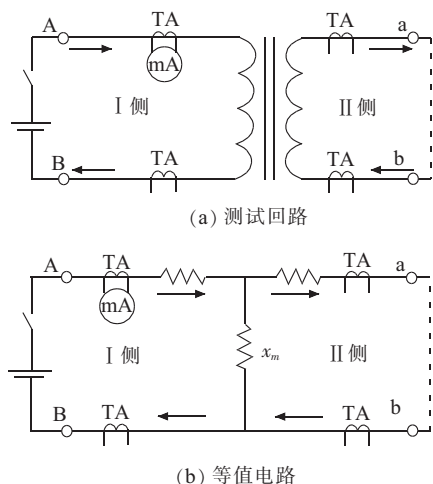


图 2 直流法变压器套管 TA 测试原理

## 2.3 换流变直流法一次通流试验方案

对于双极 12 脉动换流站,一般一个极由 6 台单相双绕组变压器分别连接成  $Y_n Y$  及  $Y_n D$  接线的

两台三相换流变。直流法通流试验时,对换流变按相分别进行,利用干电池组在换流变网侧某相加阶跃直流电压,实际为零序电压,为使换流变回路暂态零序电流能够流通,应保证试验时换流变有零序通路<sup>[9]</sup>。在换流站直流相关部分投运前或停运检修期间,换流变及直流场停电,换流变阀侧地刀(位于阀厅内)处于合位。试验时,打开换流变网侧接地刀闸,利用干电池组在换流变网侧对地加阶跃直流电压,对于  $Y_n D$  接线换流变,D 绕组为零序电流提供了通路;而  $Y_n Y$  接线换流变阀侧中性点不接地,没有零序通路,由于励磁阻抗很大网侧暂态零序电流很小且变化缓慢。因此,进行  $Y_n Y$  接线换流变试验时,在其位于阀厅内的中性点处加临时接地线,同时阀侧地刀处于合位,构成了零序通路。试验接线如图 3 所示,零序等值电路与图 2(b)类似。

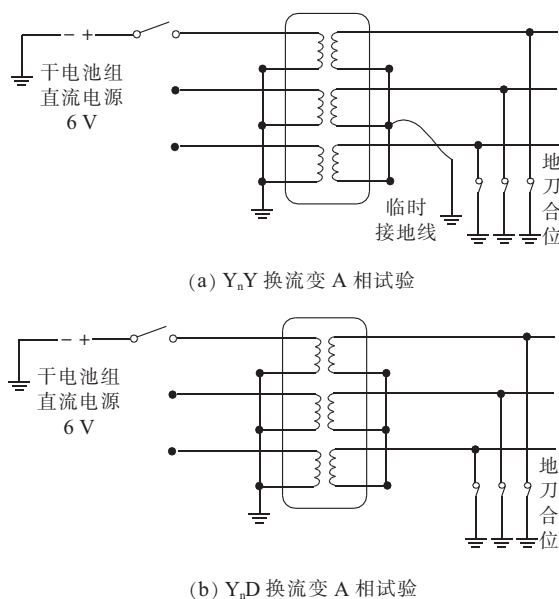


图 3 直流法试验方案

## 3 换流变套管 TA 极性测试的交流法

### 3.1 交流法原理

交流法一次通流试验中,将换流变阀侧短接,并视其为纯感性负载,在换流变一次回路中加三相对称的交流电压,回路接线如图 4(a)所示。采用对称交流电压中某一相为参考相量(如以 A 相电压作为参考),可验证换流变 TA 反映出的极性。当检测的 A 相电流滞后 A 相电压  $90^\circ$  时,TA 应为减极性 ( $P1, S1$ ) 接入方式,当电流超前电压  $90^\circ$  时,应为  $P1, S2$  接入方式,如图 4(b)所示;根据三相电流与参考电压的相对位置可确定二次电流回路的相序,如图 4(c)所示。

### 3.2 换流变交流法一次通流试验方案

一次通流前的准备工作:合上 TA 端子箱和屏

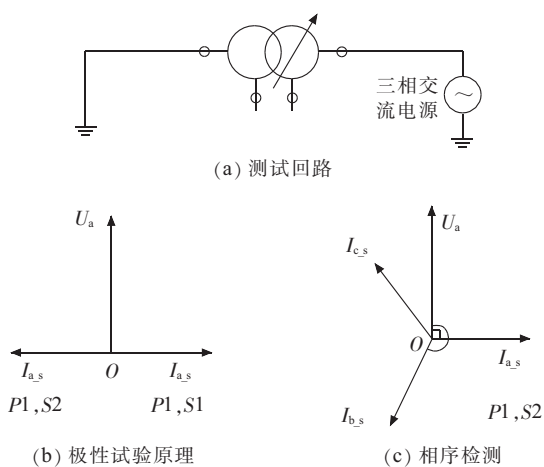


图4 换流变TA极性交流法测试原理

柜内端子排上所有连片,并检查整个TA回路有无开路。为确保一次通流安全进行,将TA二次回路断开一点,用万用表检查二次回路的阻值,以保证TA二次回路连通。将保护室所有二次装置电源正常投入,保护功能压板投入,保护出口压板断开。换流变交流法一次通流和变压器短路试验类似。由于系统一次接线已经完成,在换流变停电期间,其阀侧地刀(位于阀厅内)处于合位。为了接线方便,试验选择在换流变网侧引线处加三相交流电源,并打开换流变网侧接地刀闸,换流变阀侧由于地刀合位而处于短路状态,现场试验用三相交流电可直接取自站内380V检修电源箱。交流法一次通流时,通流电源为三相正序对称电源,可通过换流变单相数学模型计算等值参数<sup>[9,10]</sup>,由于励磁阻抗数值很大,试验时不考虑励磁支路的影响。

### 3.3 换流变差动保护电流回路检测

换流变保护主要由差动保护构成,差动电流计算的正确性受TA变比及二次回路接线等影响。交流法一次通流可对整个二次回路进行检查,通流时应特别检查差动保护相关电流的大小及极性。换流变差动保护中,电流正方向应与区内故障时电流流向一致。交流法一次通流与换流变的短路试验类似,属于换流变差动保护区外故障,流过穿越性电流,以A相为例,其电流方向如图5所示。其中网侧A套管、B套管的TA分别为TA1,TA2,阀侧a套管、b套管的TA分别为TA3,TA4,以下相同。

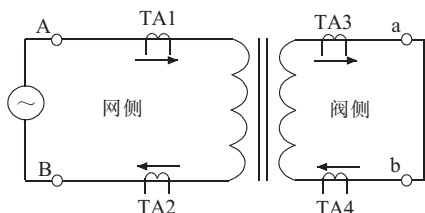


图5 交流法一次通流时换流变电流方向说明

无论TA极性及其二次回路如何接线,要使差动保护能正确反映区内外故障。通流试验中,流入保护的电流方向应满足如表1所示的要求,其中电流方向为“正”表示A相电流(三相正序电流)滞后参考电压(取电源A相电压)约 $90^\circ$ ,电流方向为“负”表示A相电流滞后参考电压约 $270^\circ$ 。据此可进行TA二次回路接线正确性的整组测试。

表1 换流变保护中的电流方向

差动保护	电流方向			
	TA1	TA2	TA3	TA4
大差	—	—	负	—
引线差	负	—	—	—
小差	正	—	负	—
网侧绕组差	正	负	—	—
阀侧绕组差	—	—	负	正

## 4 应用实例

在政平换流站换流变保护改造的调试工作中,采用本文的直流和交流一次通流方法对换流变保护相关TA二次回路检验。换流变套管TA二次出线从换流变就地端子箱引至相应的接口柜(TCI柜),并从TCI柜输出给换流变保护柜(CTP柜)。通流试验前,通过二次回路查线,明确了TCI柜至CTP柜的二次接线,如表2所示。其中,引线差与小差共用TA1同一绕组电流,但回路反接。

表2 TCI柜至保护柜的二次接线方式

换流变 TA	差动保护				
	大差	小差	引线差	网侧 绕组差	阀侧绕 组差
TA1	—	正	反	正	—
TA2	—	—	—	反	—
TA3	反	反	—	—	反
TA4	—	—	—	—	正

### 4.1 直流法一次通流试验

试验前准备工作如下:打开换流变交流侧进线接地刀闸;试验用直流电源(干电池组)经临时开关用高空接线钳连接至换流变进线隔离刀与主变之间的高压引线;在阀厅内将 $Y_n Y$ 接线换流变阀侧中性点用临时接地线连接至阀厅内接地铜排,构成通流试验接线,如图6所示为极I换流变A相试验时的接线图。

试验时,在TCI柜中相应端子串接mA表观察其偏转,极I换流变A相试验操作步骤为:(1)打开被测TA二次回路中TCI柜端子排至换流变保护的电缆接线;(2)将mA表串接入该端子,其中TCI输出给换流变保护的电流端子接mA表正极;(3)

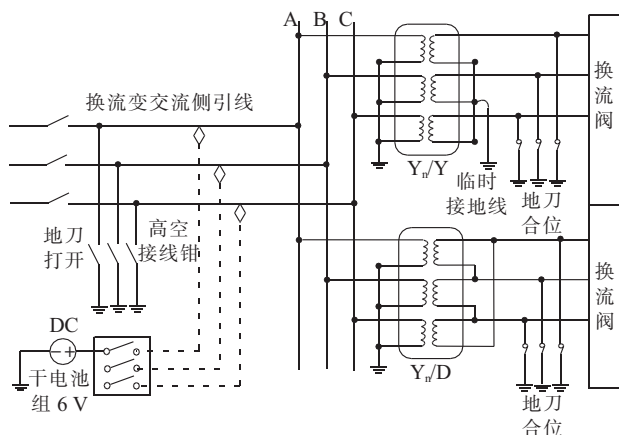


图6 极I换流变A相直流法测试接线

开关A相闭合时,观察开关闭合时 mA 表的偏转方向;(4) 恢复 TCI 至换流变保护的二次回路接线;(5) 重复上述过程,对极 I 两台换流变 A 相所有套管 TA 的极性进行测试。

对于极 I 的 B 相、C 相及极 II 三相,试验方法及步骤类似。极 I 换流变 A 相 TA 绕组试验结果如表 3 所示,B 相、C 相相同。

表3 极I换流变A相TA试验结果

换流变 TA	Y <sub>n</sub> D	Y <sub>n</sub> Y
网侧 A 套管 TA1	正偏	正偏
网侧 B 套管 TA2	正偏	正偏
阀侧 a 套管 TA3	正偏	正偏
阀侧 b 套管 TA4	正偏	正偏

#### 4.2 交流法一次通流试验

试验前准备工作如下:打开换流变交流侧接地刀闸;试验用 380 V 电源取自站内 380 V 检修电源箱,经空开连接至换流变进线隔刀与主变之间的高压引线。利用相位表进行电流相量测量,以电源 A 相电压作为参考,由于换流变保护屏位于主控室 3 楼,距离试验电源较远且接线不便,同时考虑到 TCI 柜至换流变保护的二次电缆接线在回路查线时已经明确,故在 TCI 柜端子处进行电流相量测量,将试验电源的 A 相电压用接线板引入 TCI 柜,极 I 换流变交流法一次通流试验接线图如图 7 所示。

政平站换流变网侧套管 TA 变比为 2 000/1, Y<sub>n</sub>Y 换流变电压及其阀侧 TA 变比分别为 500/200.4 和 3 000/1, Y<sub>n</sub>D 换流变电压及其阀侧 TA 变比分别为 500/(1.732×200.4)和 2 000/1。通流试验时,利用钳形电流表测的 380 V 交流电源输出电流有效值约 6.7 A。极 I 换流变一次通流结果如表 4 所示。其中,测量的电流相量为 TCI 柜端子输出给换流变保护的电流,以 A 相电压为参考,电流角度为 A 相电压超前电流的角度。

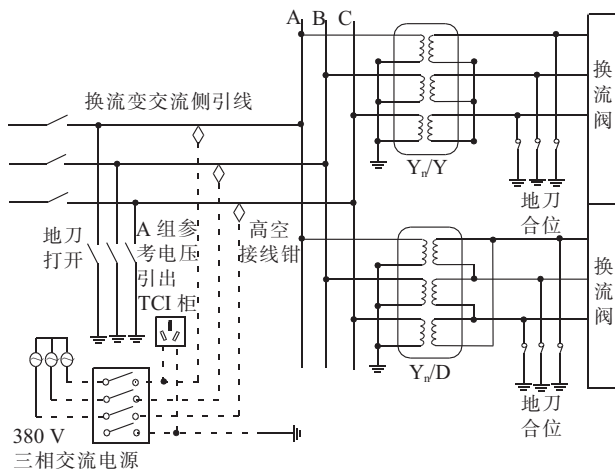


图7 极I换流变交流法一次通流接线

表4 极I换流变一次通流结果 mA

TA	相别	Y <sub>n</sub> D 侧电流		Y <sub>n</sub> Y 侧电流	
		A 套保护	B 套保护	A 套保护	B 套保护
网侧 A 套管	A	1.6∠89°	1.6∠89.6°	1.6∠87.9°	1.6∠89°
	B	1.6∠210°	1.6∠210°	1.6∠209°	1.6∠209°
	C	1.6∠327°	1.6∠327°	1.7∠328°	1.7∠328°
网侧 B 套管	A	1.6∠88.5°	1.6∠88°	1.6∠88°	1.6∠90°
	B	1.6∠210°	1.6∠209°	1.7∠210°	1.7∠210°
	C	1.6∠329°	1.6∠327°	1.6∠328°	1.6∠329°
阀侧 a 套管	A	2.4∠89°	2.5∠88°	2.8∠88°	2.8∠88°
	B	2.4∠209°	2.4∠209°	2.9∠209°	2.9∠209°
	C	2.4∠328°	2.4∠329°	2.9∠329°	2.8∠328°
阀侧 b 套管	A	2.4∠89°	2.4∠88°	2.4∠88°	2.4∠89°
	B	2.4∠210°	2.4∠209°	2.9∠209°	2.9∠209°
	C	2.4∠328°	2.4∠328°	2.9∠328°	2.9∠328°

根据表 4 试验结果,结合表 2 中 TCI 柜与 CTP 柜间的二次电缆接线,可检验二次电流回路接线极性及相序。试验中,进一步利用相位表在保护屏、故障录波等处测量各 TA 的二次回路电流,检查是否有多点接地或寄生回路产生分流,并检查保护装置显示的模拟量测量值、差流等是否正确。试验结果表明交流一次通流方案能对换流变二次回路进行整组检测,有助于确定 TA 二次回路极性,并验证 TA 二次回路的相序、接线及 TA 变比等的正确性。如果以上项目都符合设计要求,就可断定换流变 TA 二次回路接线正确,且回路完整,具备启动条件。

## 5 结束语

一次通流试验可在高压直流换流站调试过程中有效地检查二次回路接线的正确性和完整性。本文主要介绍了利用直流法和交流法一次通流进行换流变套管 TA 二次回路检查的原理、方法及实现方案。直流法通流能用于检验 TA 极性,其相对灵活简单,

受现场条件限制较小。交流法一次通流试验受现场条件、工程进度等限制,但能对二次回路的接线、极性、相序、TA 变比等进行整组测试。在政平换流站调试工程的应用,证明了该方法的可行性和有效性。

#### 参考文献:

- [1] 国家电网公司标准,Q\_GDW 118—2005 直流换流站二次电气设备交接试验规程[S].
- [2] 国家电力调度通信中心. 国家电网公司继电保护培训教材(下册)[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
- [3] 邓清清,项巍. 500 kV 主变一次通流试验模型及方案的研究[J]. 继电器,2008,36(7):92-95
- [4] 徐灵洁,周琦,周永佳,等. 电流互感器基本误差现场检定一次升流方法的研究[J]. 浙江电力,2010(5):15-17.
- [5] 吴建辉,郑新才,刘艳玲. 变压器套管电流互感器试验方法探讨[J]. 变压器,2010,47(6):42-43.
- [6] 王昌荣,周惠安,刘清培,等. 电流互感器极性、变比、相序正确性试验方法[J]. 青海电力,2011(30):45-48.

- [7] 袁季修,盛和乐,吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京:中国电力出版社,2004.
- [8] 王正茂,阎治安,崔新艺,等. 电机学[M]. 西安:西安交通大学出版社,2009.
- [9] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995.
- [10] 陈珩. 电力系统稳态分析[M]. 北京:中国电力出版社,1995.

#### 作者简介:

李鹏(1982),男,陕西周至人,工程师,从事继电保护工作;  
袁宇波(1975),男,江苏丹阳人,高级工程师,从事继电保护工作;  
黄浩声(1979),男,浙江温岭人,工程师,从事继电保护工作;  
张佳敏(1986),男,江苏靖江人,工程师,从事继电保护工作;  
高磊(1982),男,山东青岛人,高级工程师,从事继电保护工作。

## Research and Application on One Time Through-Flow Test Methods of HVDC Converter Rheological

LI Peng, YUAN Yu-bo, HUANG Hao-shen, ZHANG Jia-min, GAO Lei

(Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** It is a complicated and difficult job to make sure the polarity of the bushing current transformers (TA) and correctness of its secondary circuit in HVDC converter transformer protection debugging. Combined with practical engineering applications, the method that uses one time through-flow to check secondary circuit of converter transformer bushing TA with DC and AC is proposed in this paper. On the basis of the introduction about the side of the same name and polarity of transformer, the theory that uses one time through-flow to check secondary circuit of converter transformer bushing TA with DC and AC is analyzed, and the key problems and complete implementation on methods and site applications is given in this paper. Taking advantage of renovation debugging on the zhengping converter transformer protection, the method that uses one time through-flow to check secondary circuit of converter transformer bushing TA with DC and AC is applied to the practical work to check the correct and integrity of secondary current loop polarity and wiring. The effectiveness of this program is verified with starting the test with a load test in spot.

**Key words:** HVDC converter rheological; secondary circuit of TA; one time through-flow test; converter transformer protection

(上接第 25 页)

## Research on Increasing Power System Damping with Wind Turbine-driven Doubly-fed Induction Generator

CHEN Fan<sup>1</sup>, DAI Shen-hua<sup>2</sup>, GUI Guo-liang<sup>2</sup>

(1.School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2.Electrical Power Research Institute of Anhui Power Company, Hefei 230601, China)

**Abstract:** The wind power has more significant influence on the power grid because of its growing installed capacity. So it is of importance to study the influence of wind power on the power system damping. A multi-machine system model with wind turbine-driven doubly-fed induction generator (DFIG) was built for the small signal stability analysis. To increase the power system damping, an additional damping control was applied into the controller in the rotor side of the DFIG. The change of system damping after the additional damping control was added was got by eigenvalue analysis and proved by time domain simulations in the WSCC 3-generator-9-bus system. The results showed that the additional damping control has good effect on the system damping.

**Key words:** DFIG; damping; signal stability; additional damping control; eigenvalue analysis; time domain simulations