

一起风电场解列保护拒动的分析及改进措施

王彦国,余群兵,徐光福

(南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102)

摘要:集中式并网风电一方面要防止在系统轻微故障时机组脱网,另一方面在风电场升压站本侧送出线故障时要求能迅速解列。针对工程中一起典型的风电场升压站本侧送出线接地故障后解列保护拒动的事故进行了分析,遵循风电场低电压穿越特性,通过增加进线保护动作辅助判据,对低压解列保护进行了改进。改进后保护即可在系统轻微故障时保障风机不脱网连续运行,维护了并网风机的经济效益;同时又保证了在风电场升压站本侧送出线故障时可迅速解列风电,提高了电网的安全稳定性。

关键词:低电压穿越;低压解列;风电场;继电保护

Abstract: The large-scale grid-connected wind farm should avoid taking off the grid when minor faults occur on one hand, on the other it needs to isolate promptly as soon as the own outgoing line faults of boost station of wind farm occurs. A protective action resistance for fault disconnection of wind farm after the typical ground fault of outgoing line in booster station is analyzed, and following the low-voltage ride-through characteristics of wind farm, the under-voltage isolation protection is improved by adding outgoing line protections as auxiliary criterion. After the improvement, the protections ensure the wind farm in continuous operation will not be taken off the grid when minor faults occur, which maintains the economic benefits of wind farm. Meanwhile it ensures the prompt isolation when the faults of own outgoing line in boost station occur, which improves the safety and stability of power grid.

Key words: low-voltage ride-through; under-voltage separation; wind farm; relay protection

中图分类号: TM615 文献标志码: B 文章编号: 1003-6954(2017)06-0076-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.06.017

0 引言

随着新能源和电力电子技术的迅速发展,风电并网从小容量装机、接入地区配电网络、就地消纳的分散式方式发展为集团式建设、采用超高压远距离输送、异地消纳的集中式方式^[1-2]。风电集中接入系统后,如仍采用应对分散式风电的简单联跳做法,则会发生因小的电网故障造成大量风电机组被切除的事故,造成系统功率缺额,电网电压继续跌落,甚至引起大面积的停电,带来系统稳定问题^[1,3]。因此,为了避免小的电网故障造成大面积风电被切除,并网的风电机组要求具备低电压穿越能力^[4-7]。

当其他风电场送出线或升压站内发生故障,导致本侧风电场并网点电压降低时,低电压穿越特性可保证风机在不脱网区域连续运行,有助于系统稳定,同时也保障了并网风电的效益;但如果本侧送出线发生故障,受具备低电压穿越特性的风电机组的

电压支撑影响,低压解列保护会延缓动作、甚至拒动。下面对工程中一起风电场升压站本侧送出线接地故障后解列保护拒动的事故进行了分析,遵循风电场低电压穿越特性,通过引入进线保护动作判据,对低压解列保护进行了改进。

1 事故经过

图1为集中式方式的典型接线,风电机组通过单机单变,将低压(0.69 kV)通过箱变升高至中压(10 kV或35 kV),多台风电机组汇集到一条集电线接入中压汇流母线,再通过风电场主变压器升压至更高电压(一般为110 kV),通过送出线并入系统。

故障如图1所示,110 kV本侧送出线发生A相接地故障,配置的送出线主保护光纤差动瞬时跳开1DL、2DL,但安装于风电场1升压变压器的110 kV母线的故障解列装置的保护未动作。装置定值单如表1所示。

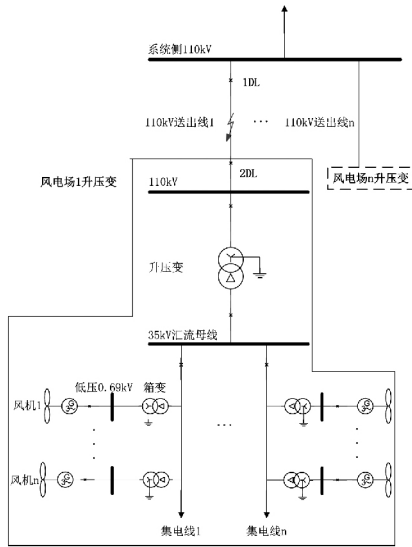


图1 风电集中接入系统
表1 故障解列保护定值单

保护类别	定值	时间/s
低压解列	50 V	0.1
过压解列 I 段	115 V	1.3
过压解列 II 段	111 V	10
低频解列	47.8 Hz	1.3
过频解列	50.6 Hz	1.3

提取故障解列装置在该时刻的录波,如图2所示,明显看出在故障后A相电压跌落,但数周波后电压抬升。

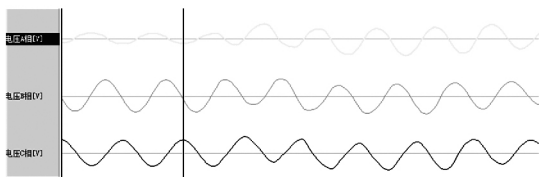


图2 故障解列装置录波

解列保护采用线电压判据,线电压幅值和频率特性分析如图3所示。

由图3分析可知:

1) 发生故障后电压跌落,基本不变,短时间内所有电压抬升,每个线电压都有大于过压解列定值的情况,但持续时间只有1~3个周波,过压解列保护因计时器不满足未动作。

2) 约420 ms后线电压跌落至50 V以下,低压解列保护起动,但不到520 ms时所有线电压都跌落至15 V以下。此时低压解列计时未满足,故障解列装置在这种三相失压情况下判定风电机组已全部自行解列,不再重复动作,低压解列保护返回;

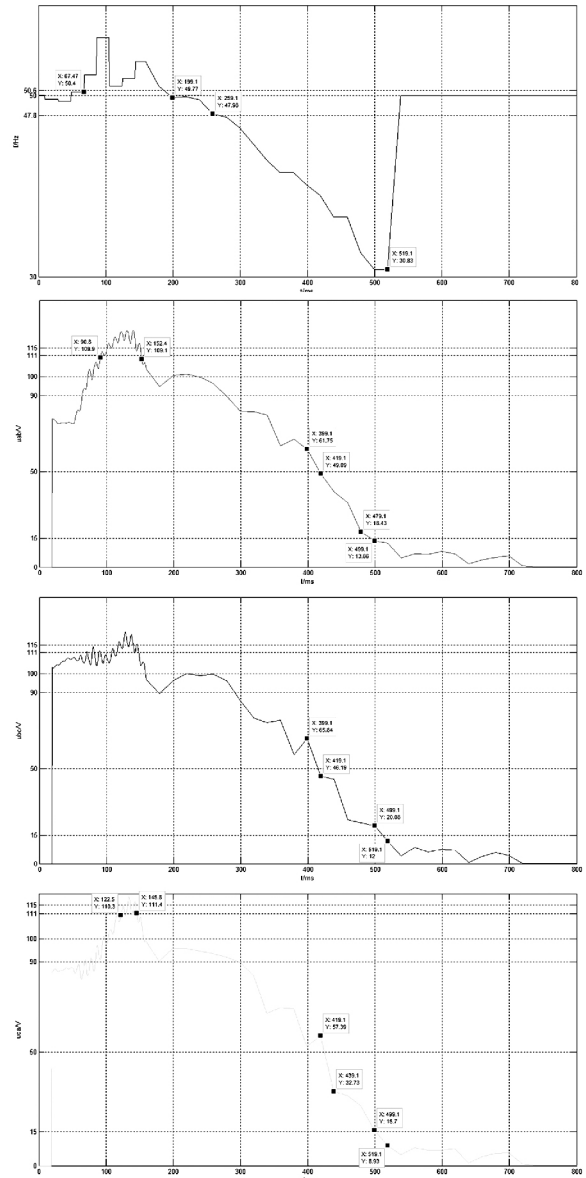


图3 电压频率分析

3) 频率在故障后先缓慢下降,但降幅达不到低频解列定值,在短时间后频率迅速爬升,大于过频解列定值,但持续约6个周波后又回落至过频定值以下,过频解列保护因计时器不满足未动作;

4) 约260 ms后频率跌落至低频解列定值以下,低频解列保护起动,但700 ms后电压全部跌至0,无法再基于电压计算频率,频率恢复至默认工频值,低频解列保护返回。

可见由于电压和频率在故障后出现先缓慢降低、再短时间迅速抬升、然后再降低的现象,导致解列保护均未动作。针对该问题,结合风机的运行特性对故障全程做进一步分析。

2 故障分析

根据110 kV本侧送出线故障后的动作、重合闸波形,可得到如图4所示的故障全程动作时序。

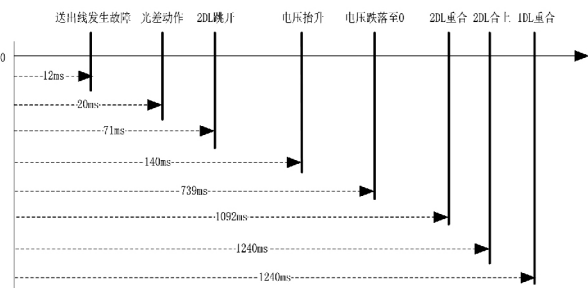


图4 故障全程动作时序

1) 0~12 ms: 110 kV本侧送出线发生A相接地故障,此期间保护尚未动作,110 kV母线A相电压降低,B、C相电压保持不变,风电机组仍保持与电网相连,保持正常运行,110 kV本侧送出线两侧都流过短路电流。

2) 20 ms时本侧送出线主保护动作,71 ms时跳开本侧开关2DL。

3) 71~140 ms:在检测到母线电压降低后,风电传动将控制转换为电网支撑模式,风电机组不再发送有功功率,而是通过向电网反送无功功率来支撑电网电压。

线电压在此期间全部升高,最大值都大于过压解列定值;频率也随之迅速升高,最大值大于过频解列,但两种保护都不满足动作时间。

4) 140~739 ms:在检测到母线电压返回至正常值之上后,风电传动控制关闭电网支撑模式,再次发送有功功率。此时故障点仍然存在,没有无功支撑,母线电压开始下降。739 ms时所有电压降低至0,说明风机低压侧0.69 kV动作,风机全部脱网,从2DL跳开计时约670 ms,证明了风机脱网时间符合低电压穿越曲线特性。

在电压跌落期间,控制系统通过调节风电机组的桨距角来减少捕获的风能,进而减小风机的机械转矩以稳定风电机组的转速,保证风机的稳定运行^[12-13]。由图3可见,抬升后的频率数周波后即被调低至工频附近,在电网支撑模式关闭后,频率开始衰减,在电压低于频率计算门槛后,频率恢复至默认值50 Hz。

5) 1 092 ms时2DL重合闸动作,1 099 ms时

2DL重合成功。

6) 1 240 ms时1DL重合闸动作,合于故障,1DL加速跳开。

可见,具备低电压穿越能力的风电机组,在本侧送出线发生故障后,风机会因低电压穿越失败而脱网。但由于电压、频率的逐步衰减,必须要等到低电压穿越时间到达后才与系统解列,这一特性将造成送出线重合闸、备自投延缓动作^[7]。针对该问题,参照GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》相关要求,对解列保护做出改进。

3 改进措施

《风电场接入电力系统技术规定》对风电场的运行适应性有明确规定^[6]:

1) 对于电压范围,当风电场并网点电压在本侧送出线的90%~110%额定电压之间时,风电机组应能正常运行;当风电场并网点电压超过本侧送出线的110%时,风电场的运行特性由风电机组的性能确定。

2) 对于频率范围,要求如表2所示。

表2 风电场在不同电力系统频率范围内的运行规定

频率范围	要求
< 48 Hz	根据风电场内风电机组允许运行的最低频率而定。
48 ~ 49.5 Hz	每次频率低于49.5 Hz时要求风电场具有至少运行30 min的能力。
49.5 ~ 50.2 Hz	连续运行。
> 50.2 Hz	每次频率高于50.2 Hz时,要求风电场具有至少运行5 min的能力,并执行电力系统调度机构下达的降低出力或高周切机策略,不允许停机状态的风电机组并网。

由以上规定看出,风电场基于电压、频率的保护以保护风机为目的,这与电网继电保护以维护系统稳定为目的存在矛盾^[8-11]。以此故障为例,本侧送出线单相接地后过压、过频只维持几个周波,如依赖过压、过频保护来解列风电场,则必须减小动作时间,这不但违背了《风电场接入电力系统技术规定》的相关要求,而且在其他送出线或系统轻微故障时可能导致保护误切本侧风电场,造成事故扩大的现象。对于低频保护,考虑风电场升压站的母线频率在故障后跌落一般要经过一段时间,此外参照表2

相关规定,也不满足风电场迅速解列的需求。

综上所述,选择低压解列保护来进行改进。该保护配置两段,Ⅰ段增加进线保护动作辅助判据,在本侧送出线故障后瞬时动作;Ⅱ段遵循低电压穿越曲线特性,在其他送出线或系统故障后判低电压穿越失败才动作。

3.1 进线保护动作辅助判据

以图1接线为例,故障解列装置引入送出线两端开关1DL、2DL的保护跳令,本端2DL信号在常规站可由硬开入方式接入装置,在智能站可由过程层GOOSE方式接入;远端1DL信号需通过光纤接入。此外再引入1DL、2DL的KKJ1、KKJ2合后位置,在送出线开关执行手动跳闸操作时闭锁解列。如不考虑远端系统侧母线故障或其他站内故障跳开1DL后迅速解列风电场的需求,1DL信号可不接入。

进线保护动作辅助判据不引入送出线开关的跳闸位置,一方面考虑到在保护动作后开关跳开需经过20~50ms延时;另一方面由上节分析可知,2DL开关跳开隔离故障后母线电压受风电电网支撑模式影响迅速升高。如引入跳闸位置,则在开关跳开后再经过通道传输延时和信号确认延时,电压可能已升高至定值以上,造成保护拒动的现象。

改进后低压解列Ⅰ段逻辑:当送出线开关1DL、或2DL保护动作信号由0至1变化时,展宽时间。此时如对应开关KKJ为1,且低压解列Ⅰ段起动,则不经延时瞬时出口。保护逻辑图如图5所示。

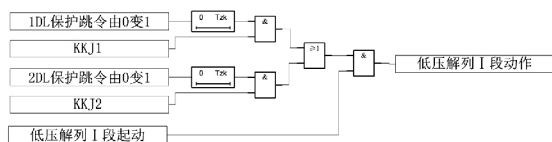


图5 低压解列Ⅰ段逻辑

由上节分析可知,当本侧送出线故障时,风电场低电压穿越失败,因此低压解列Ⅰ段不必遵循低电压穿越特性曲线,电压定值可抬高至额定电压的70%~90%,保证故障后迅速启动;在进线保护动作辅助判据置1时,比起故障发生时刻已经过送出线主保护动作延时、保护动作信号传输延时、故障解列装置信号确认延时,因此低压解列Ⅰ段保护不设延时瞬时动作。

改进后的低压解列Ⅰ段使用如表3所示的定值,采用所提故障波形回放测试。

由图6波形看出,当故障解列装置判进线保护

表3 改进后低压解列Ⅰ段定值

电压定值	80 V
时间定值	0

动作为1时, U_{ab} 电压低于80V,低压解列Ⅰ段成功动作。

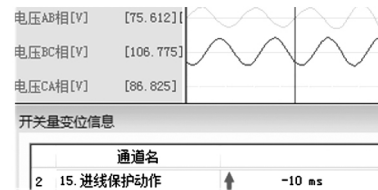


图6 改进后低压解列Ⅰ段成功动作波形

3.2 低电压穿越特性判据

参照国家电网公司企业标准Q/GDW 392-2009《风电场接入电网技术规定》,对风电场低电压穿越能力的要求如图7所示(为额定电压)。

- 1) 风电机组具备在并网点电压跌落至20%额定电压时能够保证不脱网连续运行625ms的能力;
- 2) 并网点电压在跌落2s内能够恢复到额定电压的90%时,风电机组保证不脱网连续运行^[6-7]。

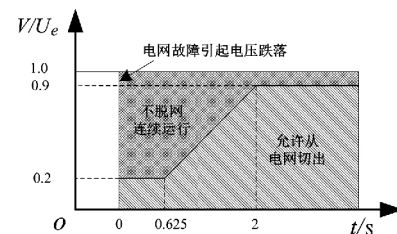


图7 风电场低电压穿越要求

参照图7的风电场低电压穿越特性曲线,低压解列Ⅱ段增设4个与低电压穿越相关的参数:

- ① U_{l0} 为正常运行时最低电压限值;
- ② U_{l1} 为可耐受的电压下限;
- ③ T_0 为电压跌落到 U_{l0} 需要保持并网的时间;
- ④ T_1 为电压跌落到 U_{l1} 需要保持并网的时间。

参照图7设置默认值如下

表4 低压解列Ⅱ段低电压穿越相关参数默认值

定值	默认值
U_{l0}	$0.9U_e$
T_0	2 s
U_{l1}	$0.2U_e$
T_1	0.625 s

根据这4个参数,可计算出不断网连续运行区域和允许从电网切出区域的分界线的斜率。

$$k = \frac{U_{l0} - U_{l1}}{T_0 - T_1} \quad (1)$$

低压解列 II 段保护设置低电压穿越计时器 T_{lv} ，电压降低确认计数器 $cnt1$ 、 $cnt2$ 。当并网点电压跌落至 U_{l0} 以下时，计时器 T_{lv} 开始计时，在电压恢复至 U_{l0} 以上或低压解列 II 段保护动作或退出后，计时器 T_{lv} 清零。

在 T_{lv} 计时期间，如电压低于 U_{l1} ，连续确认满足 $cnt1$ 后保护动作。当 T_{lv} 大于 T_1 后，如果并网点电压 U 跌落于允许从电网切出区域，则满足式(2)：

$$\frac{U - U_{l1}}{T_{lv} - T_1} < k \quad (2)$$

展开得：

$$U < kT_{lv} + U_{\Delta} \quad (U_{\Delta} = U_{l1} - k \times T_1) \quad (3)$$

该情况下连续确认满足 $cnt2$ 后保护动作。

以表 4 默认值为例，对低压解列 II 段逻辑描述如图 8 所示。

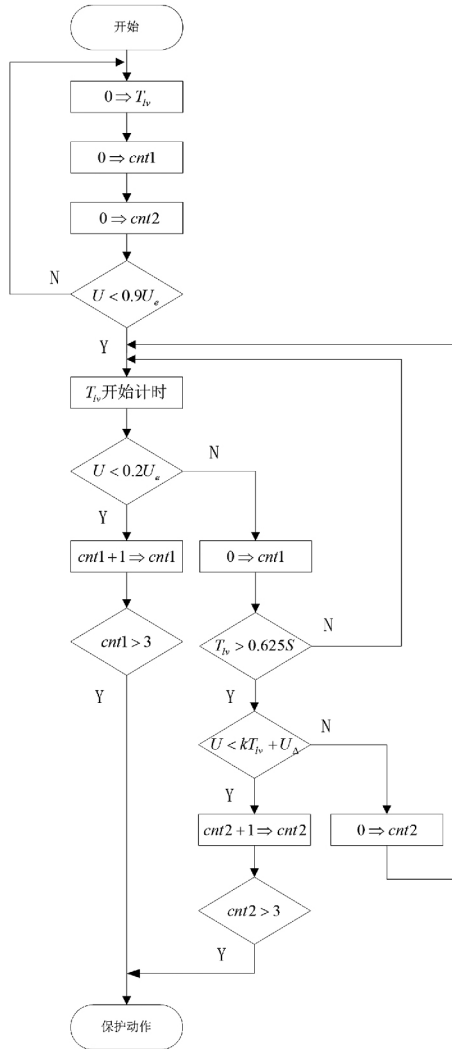


图 8 低压解列 II 段流程

低压解列保护具备曾经有压判据，即装置首次上电后电压一定要大于 U_{l0} ，持续短延时后低压保护才确认投入；低压元件动作返回后，也要曾经有压，保护才能再次投入。因此可避免风电场解列后电压消失时低压元件重复动作。低压解列出口接点动作后经固定短延时收回，避免在保护动作后电压低于定值时接点一直闭合。

对于增设的低电压穿越相关参数，在工程运行时可根据不同类型的风电机组特性进行微调，使低压解列 II 段保护在风机低电压穿越失败前先一步动作。

4 结 语

集中式并网风电机组具备低电压穿越能力，在风电场升压站本侧送出线故障时会发送无功来支撑电网电压，导致解列保护有拒动风险，造成后续重合闸、备自投延缓动作。选择低压解列保护进行了改进，其中 I 段速动保护增加进线保护动作辅助判据，II 段保护遵循风电场低电压穿越特性曲线。该措施已在西北地区工程中得到验证，改进后的保护既保障了风机在系统轻微故障时不脱网连续运行，维护了并网风机的经济效益，又在本侧送出线故障时可迅速解列风电，提高了电网的安全稳定性。

参考文献

- [1] 何世恩, 姚旭, 徐善飞. 大规模风电接入对继电保护的影响与对策[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 21-27.
- [2] Globe Wind Energy Council(GWEC). World Wind Report 2011 [R/OL]. [2012-03-01]. <http://www.gwec.net/publications/global-wind-report-21>.
- [3] 张保会, 王进, 李光辉, 等. 具有低电压穿越能力的风电接入电力系统继电保护的配合[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(3): 1-6.
- [4] 国家电网公司. Q/GDW 432—2010 风电调度运行管理规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 中国电力科学研究院. 风电并网研究成果汇编[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2010: 12-45.
- [6] 国家电网公司. Q/GDW 392—2009 风电场接入电网技术规定[S]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [7] 高雯. 风电场接入对固原电网继电保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013: 10-11, 15-19.
- [8] 焦在强. 大规模风电接入的继电保护问题综述[J]. 电

网技术 2012, 36(7): 195-201.

- [9] Smith J C, Milligan M R, Deneo E A, et al. Utility Wind Integration and Operating Impact State of the Art [J]. IEEE Trans. on Power Systems 2007, 22(3): 900-908.
- [10] Sulla F, Svensson J, Samuelsson O. Symmetrical and Un-symmetrical Short-circuit Current of Squirrel-cage and Doubly-fed Induction Generators [J]. Electric Power Systems Research 2011, 81(8): 1610-1618.
- [11] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
- [12] 朱永强, 张旭. 风电场电气系统 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 124-126.

- [13] 张保会. 分散式能源发电接入电力系统科学技术问题的研究 [J]. 电力自动化设备, 2007, 27(12): 1-4.

作者简介:

王彦国(1983), 硕士、工程师, 主要研究方向为电力系统中 110 kV 及以下继电保护、新能源发电保护控制;

余群兵(1979), 硕士、工程师, 主要研究方向为电力系统中 110 kV 及以下继电保护;

徐光福(1982), 硕士、工程师, 主要研究方向为电力系统中 110 kV 及以下继电保护、分布式发电保护控制。

(收稿日期: 2017-07-06)

(上接第 60 页)

基础上, 以满足需求风量并留合适的裕度为目标进行风机选型, 最终得到风机的工作点及电机的总风量为 $39.9 \text{ m}^3/\text{s}$, 保证了通风系统能为发电机各发热部件的冷却提供足够的风量, 解决了高海拔条件下空气稀薄对于发电机通风系统的影响。

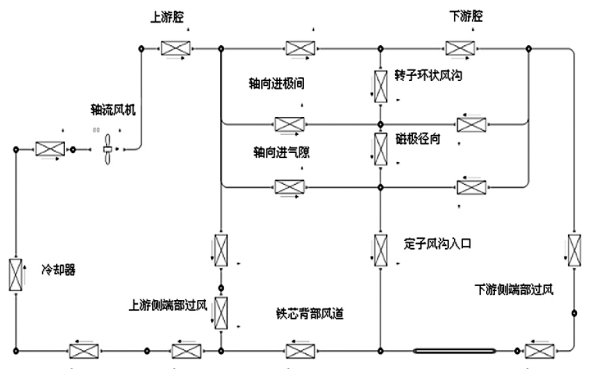


图3 发电机通风系统等效计算网络

另外, 多布发电机的冷却系统采用一次水循环方式, 即经空气冷却器热交换后的热水直接排进河道, 河水通过水泵加压后注入冷却器构成水冷却循环系统。高海拔地区一般河水温度相对较低, 多布水轮发电机冷却系统采用一次水循环方式, 冷却效果更好。

4 结 语

多布高海拔灯泡贯流水轮发电机已于 2016 年 1 月 17 日全部成功投产发电, 各项指标及参数均满足国家标准与合同要求。由于高海拔地区气候条件相当恶劣, 昼夜温差大、气温低、空气稀薄, 从而对发电机组的结构型式、材料选取、通风冷却方式、绝缘电气性能等提出了一系列的课题^[4]。通过电磁优化设计、定子防晕和绝缘海拔修正、转子磁极优化设

计和通风冷却系统选择合适风机, 解决了在高海拔地区水轮发电机易起晕、放电和散热困难等难题。发电机投运后各部件温升或温度, 见表 4。

表 4 发电机投运后各部件温升或温度
(额定功率: 30 MW)

	定子绕组 /K	正推力瓦 /($^{\circ}\text{C}$)	反推力瓦 /($^{\circ}\text{C}$)	径向轴承瓦 /($^{\circ}\text{C}$)
平均值	46	42	27	39
合同要求值	≤ 78	≤ 70	≤ 70	≤ 70

西藏多布 30 MW 灯泡贯流水轮发电机是东方电气东方电机有限公司自主设计制造的、目前高海拔地区已经运行的单机容量最大的灯泡贯流式水轮发电机。它的成功投运, 标志东方电气东方电机有限公司已经掌握了高海拔地区大型灯泡贯流水轮发电机的设计要点与难点, 为今后高海拔灯泡贯流水轮发电机的设计、研发奠定了重要基础。

参考文献

- [1] 陈锡芳. 水轮发电机结构运行监测与维修 [M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
- [2] 刘雁, 胡波, 梁智明, 等. 海拔高度对发电机定子线圈常规绝缘性能的影响 [J]. 东方电气评论, 2016, 30(4): 55-61.
- [3] 廖毅刚. 大型灯泡贯流式水轮发电机通风系统研究 [J]. 东方电气评论, 2003, 17(1): 42-46.
- [4] 付佩贤, 张翀, 祁腊梅. 高海拔、大、中容量水轮发电机的开发设计 [J]. 四川水力发电, 2015, 34(5): 148-151.

作者简介:

施明星(1986), 工学硕士、工程师, 从事水轮发电机设计工作;

鄢帮国(1983), 工学学士、高级工程师, 从事水轮发电机设计工作。

(收稿日期: 2017-09-15)