

永富直流工程功率分送控制策略研究与实现

宋延涛 刘旭辉 张爱玲 吴梦丽 许梦阳

(许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要 永富直流工程与常规直流工程相比, 其逆变站具有多种功率输送运行方式: 功率“全送广西”、功率“全送云南”、功率“极1送广西, 极2送云南”。功率“极1送广西, 极2送云南”这一分送运行方式是指逆变站将功率输送到不同的交流异步电网。为适应和满足这一特殊运行方式, 直流控制系统需增加新的控制策略。根据永富直流工程特点和需求, 本文从功率控制模式、功率自动控制、接地极电流限制等方面进行了详细研究, 提出了单极功率控制模式、单极功率自动控制、接地极电流限制等功能的控制策略和实现原理。相关控制策略已通过直流控制仿真系统实现和验证, 并在永富直流工程中进行应用。

关键词: 永富直流; 功率分送; 单极功率控制模式; 单极功率自动控制; 接地极电流限制

Research and Realization of Distributed Power Control in Yongren-funing HVDC Project

Song Yantao Liu Xuhui Zhang Ailing Wu Mengli Xu Mengyang

(XJ Electric Co., Ltd, Xuchang, He'nan 461000)

Abstract Compared with the conventional HVDC project, the inverter station of Yongren-Funing HVDC project has a variety of power transmission and operation mode: “all to Guangxi”, “all to Yunnan” and “Pole 1 to Guangxi, Pole 2 to Yunnan”. Power “Pole 1 to Guangxi, Pole 2 to Yunnan” the dispensing operation mode is referred to the inverter station power will be transported to different AC asynchronous electrical network. In order to adapt and meet the special operation mode, new control strategy is needed for the DC control system. According to the characteristics and requirements of Yongren-Funing HVDC project, this article carries out a detailed study of power control mode, automatic power control, grounding current limit etc, and a new design idea and implementation principle are proposed. The new control strategy has been implemented and verified by DC control simulation system, and has been applied in Yongren-Funing HVDC project.

Keywords: Yongren-funing HVDC project; power distribution; unipolar power control mode; unipolar power automatic control; grounding current limit

永仁—富宁直流工程(永富直流工程)是云南省观音岩水电站送出工程, 直流额定输电容量3000MW, 额定电压为±500kV, 起点位于云南省楚雄州永仁换流站, 受端位于云南省文山州富宁换流站。永富工程已于2014年8月开工建设, 计划于2016年6月底建成投运。

永富直流工程与常规±500kV直流工程的主要不同在于富宁换流站需要考虑3种运行方式, 即功率“全送广西”、功率“全送云南”、功率“极1送广西, 极2送云南”, 3种运行方式通过富宁换流站

交流场不同接线方式实现^[1]。

功率“全送广西”或“全送云南”运行方式采用的控制策略与常规±500kV直流工程的控制策略基本一致^[2-4]。但功率“极1送广西, 极2送云南”这一特殊运行方式, 为直流控制系统提出了新的挑战和更高的控制要求。为适应并满足工程需求, 本文从功率传输控制模式、功率自动控制、接地极电流限制等方面进行了详细的研究, 提出了新的设计理念和实现原理。相关控制策略已通过直流控制仿真系统实现和验证, 并在永富直流工程中进行应用。

1 单极功率控制模式

1.1 单极功率控制模式的应用

以往直流输电工程常用的功率传输控制模式有双极功率控制和单极电流控制^[5-8]两种。双极功率控制是直流系统的主要控制模式，在单极或双极运行时保证整流站输送的直流功率等于运行人员设定的直流功率整定值。单极电流控制在每个极单独实现，在单极或双极运行时保证本极直流线路中流过的直流电流等于运行人员设定的直流电流整定值。

针对永富直流工程直流功率分送运行方式，虽然也可选择双极功率控制和单极电流控制，但无法实现双极运行时双极功率控制模式下两极输送不同的直流功率。根据永富直流工程特点和运行需求，分送运行方式下应用单极功率控制模式显得尤为重要，可实现单极或双极运行时两个极能够独立控制本极输送的直流功率。故直流控制系统需增加单极功率控制模式，实现并满足工程需求。

1.2 单极功率控制模式的实现

单极功率控制模式需要在每个极单独实现，直流控制系统需根据运行人员设定的单极功率整定值和单极功率升降速率整定值，调节该极输送的直流功率到整定值。

单极功率控制模式是在单极电流控制模式的基础上实现的，具体实现过程如下。

1) 根据运行人员设定的单极功率整定值除以本极实时直流电压，得到本极电流参考值。

2) 根据运行人员设定的单极功率升降速率整定值除以本极实时直流电压，得到本极电流升降速率参考值。

3) 根据计算出来的本极电流参考值和电流升降速率参考值，按照单极电流控制模式调节到设定的单极功率整定值。

单极功率控制模式实现原理如图 1 所示。

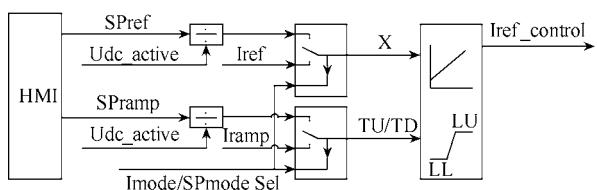


图 1 单极功率控制模式实现原理

由图 1 可以看出，在单极功率控制模式下，直流控制系统是将运行人员设定的单极功率整定值和单极功率升降速率整定值转化为电流整定值和电流升降速率整定值，控制器按照电流控制的方式来实

现直流功率的传输。

通过增加单极功率控制模式，在直流功率分送运行方式下，每极输送的功率可实现独立控制，以保持在按极设置的单极功率整定值，两极互不影响。

1.3 不同运行方式下控制模式选择

单极功率控制模式的实现，使得直流系统可以选择更多的控制模式或组合。针对永富直流工程 3 种运行方式，单极或双极运行时，可以选择不同的控制模式或组合，见表 1。

表 1 直流功率不同运行方式控制模式组合

直流功率输送方式	极	双极功率控制	单极功率控制	单极电流控制
全送广西	极 1	√	√	√
	极 2	√	√	√
全送云南	极 1	√	√	√
	极 2	√	√	√
极 1 送广西 极 2 送云南	极 1	✗	√	√
	极 2	✗	√	√

由表 1 可以看出，在富宁站全送广西或全送云南运行方式下，单极或双极运行时，每一极都有 3 种控制模式可以选择：当选择双极功率控制或单极功率控制时，直流控制系统保证整流站双极或单极的直流功率为设定的功率值；当选择单极电流控制时，直流控制系统保证本极直流线路中流过的直流电流为设定的电流值。

富宁站两极分送运行方式下，为保证两极的独立性，单极或双极运行时，每一极只有两种控制模式可选择，即单极功率控制或单极电流控制。当选择单极功率控制时，直流控制系统保证本极整流站的直流功率为设定的功率值；当选择单极电流控制时，直流控制系统保证本极直流线路中流过的直流电流为设定的电流值。

1.4 单极功率控制模式切换验证

通过永富直流工程仿真系统，运行人员可以在运行人员工作站（operator work station, OWS）进行不同控制模式之间的切换。如图 2 所示，控制模式具有双极功率控制、单极功率控制和单极电流控制 3 种，极 1 和极 2 控制模式相互独立，互不影响。

由图 2 可知，极 1 和极 2 均处于双极功率控制模式，此时极 1 和极 2 均具备切换到单极功率控制或单极电流控制允许；当极 1 控制模式为单极功率控制时，具备切换到双极功率控制或单极电流控制

允许；当极 1 控制模式为单极电流控制时，具备切换到双极功率控制或单极功率控制允许；极 2 相同。由此可知，每一极只允许一种控制模式存在，其他两种控制模式均为备用控制模式，方便运行人员根据不同的运行工况进行切换。



图 2 单极功率自动控制功能实现原理

2 单极功率自动控制功能

2.1 单极功率自动控制功能的提出

以往直流输电工程设置有双极功率自动控制功能^[9-10]，即双极均为双极功率控制模式，至少单极解锁运行，允许切换到双极功率自动控制功能，双极功率按照运行人员提前设置好的双极功率曲线运行。

针对永富直流工程直流功率分送运行方式，为满足运行需求，需要实现单极功率自动控制功能，即分送运行方式下单极功率也可按照运行人员提前设置好的单极功率曲线运行。

2.2 单极功率自动控制功能的实现

单极功率自动控制功能需要在每个极单独实现，直流控制系统需根据运行人员提前设置好的单极功率运行曲线调节该极输送的直流功率到整定值。

单极功率自动控制功能默认情况下应处于退出状态，即选择运行人员手动设置的单极功率整定值和单极功率升降速率整定值。单极功率自动控制功能的投入需根据运行的需求和调度的安排，并且需提前编制好单极功率运行曲线，该曲线可以定义多个功率-时间数值点，直流控制系统根据该曲线自动调节直流传输功率。

单极功率自动控制功能的投入需满足以下条件。

- 1) 直流控制系统处于系统控制层。
- 2) 分送运行方式下，选择单极功率控制的极。

3) 极处于解锁运行状态。

4) 有效控制位置为主控站的运行人员工作站。

单极功率自动控制功能实现原理如图 3 所示。

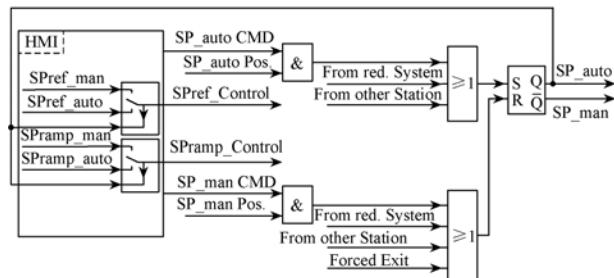


图 3 单极功率自动控制功能实现原理

由图 3 可以看出，单极功率自动控制运行时，将闭锁运行人员手动设定的功率整定值和功率升降速率整定值，选择运行人员提前设定的自动功率曲线自动下发的整定值。

在单极功率自动控制模式运行下，为保证直流输电系统正常运行，自动控制功能在以下情况下将自动退出。

- 1) 直流控制系统从系统控制层切换为站控层。
- 2) 分送运行方式下，单极功率控制模式切换为单极电流控制模式。
- 3) 极解锁状态消失。
- 4) 主/从控站切换。
- 5) 主控站系统功能控制位置（运行人员或远方调度）发生变化。
- 6) 引起参考值发生变化的外部条件，如功率提升/回降、保护起动降电流等。

通过增加单极功率自动控制功能，在直流功率分送运行方式下，每极输送的功率可实现自动调节能力，提高了运行的灵活性和高效性。

3 接地极电流限制功能

3.1 接地极电流限制功能的提出

永富直流工程直流功率分送运行方式时，当双极不平衡运行，或双极平衡运行时一极因某种原因发生功率变化，势必会引起接地极电流增大，接地极电流过大会影响到直流系统长期安全稳定运行^[11-12]。

为保证直流系统能够长期有效且安全可靠运行，需将接地极电流限制在合理的范围之内。根据工程特点和需求，直流控制系统需增加接地极电流限制功能，当检测到接地极电流超过有效范围时，通过减小流过接地极电流大的极的直流电流，将接

地极电流控制在合理范围内。

3.2 接地极电流限制功能的实现

考虑到永富工程具有多种运行方式，接地极电流限制功能设置有投退功能，当处于不同运行方式下，运行人员可自由投退此功能，增加其应用的灵活性。

接地极电流限制功能投入前，运行人员需根据调度要求通过工作站设置接地极电流限制值和电流升降速率。直流控制系统实时检测极 1 直流电流、极 2 直流电流和接地极电流，在接地极电流限制功能投入状态下，需满足以下条件此功能才可起动。

- 1) 接地极电流大于限制值。
- 2) 极 1 直流电流大于极 2 直流电流时，起动极 1 接地极限制功能；反之，起动极 2 接地极限制功能。

接地极电流限制功能实现原理如图 4 所示。

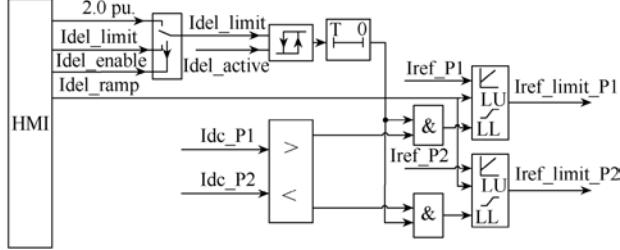


图 4 接地极电流限制功能实现原理

由图 4 可以看出，接地极电流限制功能起动时，斜坡发生器将本极当前的电流参考值按照运行人员设定的电流升降速率产生电流限制值，直流控制系统将电流限制值与本极的电流参考值取小后直接用于闭环控制器，限制本极实际直流电流。

在接地极电流低于设定的限制值后，斜坡发生器保持当前输出的电流限制值，待本极实时计算的电流容量刷新本极直流电流参考值，直流系统将本极直流电流保持在电流限制值后，斜坡发生器恢复到起动前直流电流不受限状态。

通过减小流过接地极大的极的直流电流，有效地将接地极电流限制在合理的范围之内，保证直流系统长期有效且安全可靠运行。

4 结论

根据永富直流工程的特点和需求，直流控制系统为适应和满足多种直流功率输送方式，需增加新的控制策略。本文针对直流功率分送运行方式，在功率传输控制模式方面应用了单极功率控制模式，实现了每极可独立控制本极输送的功率，两极互不

影响，提高运行的稳定性和可控性；在此基础上，提出了单极功率自动控制功能，实现了每极可自动调节本极输送的功率，提高运行的灵活性和高效性；鉴于功率分送运行方式下双极不平衡运行时，存在接地极电流过大的运行风险，提出并实现了接地极电流限制功能，保证直流系统能够长期有效且安全可靠运行。相关控制策略已在直流控制仿真系统上得到实现和验证，并在永富直流工程中得到应用。

参考文献

- [1] 刘毅力, 贾轩涛, 戴国安. 永仁-富宁直流工程三种功率输送方式自动转换顺序控制及影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(13): 139-146.
- [2] 朱韬析, 王超. 天广直流输电系统的基本控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31(21): 22-26.
- [3] 李兴源, 赵睿, 刘天琪, 等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报, 2013, 28(10): 288-300.
- [4] 张爱玲. 溪洛渡送电广东同塔双回直流输电工程控制保护策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(9): 72-76.
- [5] 王洪涛, 何润华, 施鹏程. 天广直流输电系统功率传输模式及转换条件[J]. 南方电网技术, 2012, 6(1): 30-33.
- [6] 王徭. 特高压直流输电控制与保护技术的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(15): 53-58, 64.
- [7] Siemens. Pole control system information manual[Z]. 2004.
- [8] Siemens. DC protection system information manual[Z]. 2004.
- [9] 靳玮玮, 杨兴超, 余存. 功率计划在特高压直流输电工程中的传输和实现[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 143-147.
- [10] 鄂士平, 黄浩然. 直流输电中自动功率控制的研究与实现[J]. 东北电力技术, 2013, 34(5): 1-3.
- [11] 曾祥君, 张玺, 阳韬, 等. 高压直流输电系统接地极不平衡保护改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 132-137.
- [12] 王明新, 张强. 直流输电系统接地极电流对交流电网的影响分析[J]. 电网技术, 2005, 29(3): 9-14.

作者简介

宋延涛（1986-），男，河南许昌人，硕士，工程师，主要从事高压直流输电、柔性直流输电控制技术研究、工程应用及运行维护工作。