

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局

(43) 国际公布日
2014 年 4 月 3 日 (03.04.2014)



(10) 国际公布号
WO 2014/048336 A1

- (51) 国际专利分类号:
H02J 3/12 (2006.01)
- (21) 国际申请号: PCT/CN2013/084261
- (22) 国际申请日: 2013 年 9 月 26 日 (26.09.2013)
- (25) 申请语言: 中文
- (26) 公布语言: 中文
- (30) 优先权:
201210369375.6 2012 年 9 月 27 日 (27.09.2012) CN
- (71) 申请人: 国家电网公司 (STATE GRID CORPORATION OF CHINA) [CN/CN]; 中国北京市西城区西长安街 86 号, Beijing 100031 (CN)。 中国电力科学研究院 (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE) [CN/CN]; 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。
- (72) 发明人: 王雅婷 (WANG, Yating); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 申洪 (SHEN, Hong); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 班连庚 (BAN, Liangeng); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 周勤勇 (ZHOU, Qinyong); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。

段智 (DUAN, Zhi); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 黄丹 (HUANG, Dan); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。 王一兵 (WANG, Yibing); 中国北京市海淀区清河小营东路 15 号, Beijing 100192 (CN)。

(74) 代理人: 北京安博达知识产权代理有限公司 (AM-BOYNA INTELLECTUAL PROPERTY AGENT CO., LTD.); 中国北京市海淀区大钟寺 13 号院 1 号楼华泰大厦 B215 号, Beijing 100098 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA,

[见续页]

(54) Title: COORDINATION CONTROL METHOD FOR FACTS DEVICES OF NEW ENERGY DELIVERY SYSTEM

(54) 发明名称: 一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法

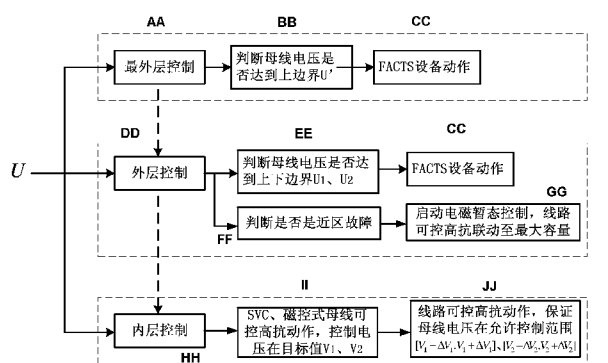


图 1 / FIG. 1

- AA Outermost layer control
BB Determine whether bus voltage reaches upper boundary U
CC Motions of FACTS devices
DD Outer layer control
EE Determine whether the bus voltage reaches upper and lower boundaries U1 and U2
FF Determine whether it is a close-in fault
GG Start magnetic transient state control, and adjust circuit controllable high resistance to maximum capacity
HH Inner layer control
II SVC and magnetically-controlled bus controllable high resistance motions, and voltage being controlled at target values V1 and V2
JJ Circuit controllable high resistance motions, ensuring the bus voltage within allowed controlled ranges $[V1-\Delta V1, V1+\Delta V1]$, and $[V2-\Delta V2, V2+\Delta V2]$

(57) Abstract: The present invention provides a coordination control method for FACTS devices of a new energy delivery system. The method comprises inner layer control, outer layer control and outermost layer control, priority level of the outermost layer control is higher than that of the outer layer control, and priority level of the outer layer control is higher than that of the inner layer control. The inner layer control can ensure that voltage of a transformer substation can be accurately controlled in a certain value or a certain range, and when the system is in large disturbance, the outer layer control and the outermost layer control can provide urgent reactive power support, so that the voltage of the transformer substation can rapidly recover to an allowed range. Three layers of voltage control are combined so that motions of a plurality of FACTS devices can be coordinated and controlled in a centralized, high accuracy and high efficiency mode, and the engineering adaptability is high.

(57) 摘要: 本发明提供一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法, 分为内层控制、外层控制和最外层控制, 其中, 最外层控制优先级高于外层控制, 外层控制优先级高于内层控制。内层控制保证变电站电压能精确控制在某个值或某个范围内, 外层控制和最外层控制在系统出现大扰动时提供紧急无功支撑, 保证变电站电压能够迅速恢复至允许范围内。三层电压控制结合的方法能够高精度、高效地集中协调控制多个 FACTS 设备动作, 工程适应性很强。

度、高效地集中协调控制多个 FACTS 设备动作, 工程适应性很强。



RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), 欧洲 (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG,

CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:

— 包括国际检索报告(条约第 21 条(3))。

一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法

技术领域

本发明属于电力系统技术领域，具体涉及一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法。

背景技术

随着新疆与西北主网联网第二通道建成，将形成第一通道—第二通道—海西通道总长度接近 3000 公里的 750 千伏双环网。该通道上串有酒泉、哈密两个千万千瓦级大型风电基地和海西光伏基地。这些地区的新能源开发呈现大规模、高集中、远距离的特点，发展迅速。随着新能源大规模馈入，风功率大范围、高频度的波动造成新疆与西北联网的两个通道上潮流波动频繁，无功电压控制困难。采用常规的低压无功补偿设备无法满足频繁投切的要求，需要采用动态无功补偿设备。根据规划论证，新疆与西北联网第二通道规划装设多套容量新型 FACTS 装置。其中，沙州~鱼卡两回线路共配置 4 组线路分级式可控电抗器，每组容量 390Mvar，固定容量 39Mvar，可调容量 351Mvar，三级可调，单级容量 117Mvar；沙州站变压器第三绕组侧配置静止无功补偿器 SVC（360Mvar 容性，360Mvar 感性）；鱼卡站母线配置 330Mvar 磁阀式母线可控高抗，固定容量为 16.5Mvar，连续可调。

目前，750kV 可控电抗器和 SVC 独立的控制策略国内已有研究，但多 FACTS 设备之间的协调控制策略在国内尚属空白。中国 750kV 敦煌站可控高抗示范工程是世界首套 750kV 风电集中送出系统应用的可控高抗工程，该工程于 2012 年 1 月 5 日成功投运。针对敦煌 750kV 可控电抗器，中国电科院系统所提出了基于无功需求增量和母线边界电压的可控电抗器内外双层控制策略，控制策略实际中应用良好，对于抑制母线电压波动、降低线路无功损耗、在暂态过程中实现母线电压动态支撑、减少站内低压无功补偿装置的动作次数和减轻站内运行压力方面作用明显。静止无功补偿器 SVC 作为无功补偿、抑制电压波动的有效手段，目前已广泛地应用于中、高压电网以及超高压电网中，并积累了多年的运行经验。SVC 主要用于在故障后暂态过程中为电网提供紧急无功功率补偿以增强电网电

压支撑以改善电网的安全稳定性,同时常态运行中提供连续的无功功率调节以抑制电压的波动。SVC 一般采用基于电压的控制策略,通过连续的调节,可以维持 SVC 所在母线电压恒定。

新疆与西北主网联网第二通道共装设 5 套 750kV 可控高抗、1 套 66kV SVC,是世界上首次在 750kV 输电系统集中应用新型大容量 FACTS 设备。实现可控高抗群之间的协调优化控制、可控高抗与 SVC 之间的协调优化控制,对于有效抑制由于新能源波动造成的二通道输电系统无功电压频繁波动非常关键。

发明内容

为了克服上述现有技术的不足,本发明提供一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法,分为内层控制、外层控制和最外层控制,其中,最外层控制优先级高于外层控制,外层控制优先级高于内层控制。内层控制保证变电站电压能精确控制在某个值或某个范围内,外层控制和最外层控制在系统出现大扰动时提供紧急无功支撑,保证变电站电压能够迅速恢复至允许范围内。三层电压控制结合的方法能够高精度、高效地集中协调控制多个 FACTS 设备动作,工程适应性很强。

为了实现上述发明目的,本发明采取如下技术方案:

本发明提供一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法,所述方法包括内层控制、外层控制和最外层控制;所述内层控制将变电站电压精确控制在电压目标值或电压控制带内;在新能源外送系统出现大扰动时外层控制和最外层控制提供紧急无功支撑,使变电站电压能够迅速恢复至允许范围内。

所述新能源外送系统为新疆与西北主网联网第二通道,风电和太阳能由联网通道外送,所述联网通道上装设 FACTS 设备;其中,在联网通道沿线的沙州站主变第三绕组侧装设 66kV 静止无功补偿器,在鱼卡开关站母线侧装设磁控式母线可控高抗,在沙州~鱼卡线路双回线路两侧装设分级式可控高抗。

所述内层控制中,内层电压控制每隔 1 分钟循环一次;沙州站和鱼卡站内层控制设置时延 30s,以避免沙州站和鱼卡站线路分级式可控高抗同时动作。

所述内层电压控制以变电站母线电压为输入量,输入沙州站控制电压目标值 V_1 、鱼卡站控制电压目标值 V_2 、沙州母线电压控制带 $[V_1 - \Delta V_1, V_1 + \Delta V_1]$ 和鱼卡

母线电压控制带 $[V_2 - \Delta V_2, V_2 + \Delta V_2]$, ΔV_1 和 ΔV_2 分别为沙州站和鱼卡站允许的母线电压偏差, V_1 、 V_2 、 ΔV_1 和 ΔV_2 的数值由用户确定。

内层电压控制时, 优先发挥沙州静止无功补偿器、鱼卡磁控式可控高抗的跟随式调节作用, 将沙州站电压和鱼卡站电压分别控制在 V_1 和 V_2 ; 当静止无功补偿器、磁控式可控高抗已达到最大/最小容量, 沙州/鱼卡母线电压仍不在电压控制带内, 此时站内的线路可控高抗触发动作; 为减少设备损耗, 可控高抗控制触发时, 沙州站线路可控高抗 I 和 II 交替动作, 鱼卡站线路可控高抗 I 和 II 交替动作, 每次动作一级;

当站内一组线路可控高抗 I 动作一级后, 若监控母线电压仍不在允许电压控制带内时, 则发触发指令给本站另一组线路可控高抗 II, 可控高抗 II 动作一级, 若此时可控高抗 II 故障或已达到最大/最小容量, 则发触发指令给可控高抗 I, 可控高抗 I 再动作一级;

当站内一组线路可控高抗 I 需要动作, 但由于可控高抗 I 自身故障或者已达到最大/最小容量, 则发触发指令给本站另一组线路可控高抗 II, 可控高抗 II 动作一级, 可控高抗 II 动作一级后, 若监控母线电压仍不在允许电压控制带内时, 则可控高抗 II 需要再动作一级。

所述外层控制以变电站母线电压为输入量, 输入外层电压上边界 $U1$ 和外层电压下边界 $U2$, 外层电压上边界 $U1$ 和外层电压下边界 $U2$ 由用户确定; 外层控制实时监测电压, 当新能源外送系统中出现大的扰动, 连续 5s 监测到母线电压在 $[U2, U1]$ 之外, 站内两组线路可控高抗 I 和可控高抗 II 同时切除或投入一级容量, 此时静止无功补偿器和磁控式可控高抗在 5s 的监测时间之内已经动态调节完毕, 达到其最大/最小容量, 线路可控高抗动作完毕后, 再开始下一次循环计时;

当发生区内故障时, 即沙州~鱼卡线路故障, 则优先电磁暂态控制; 若 5s 的监测时间之内, 站内协调控制器和线路可控高抗接收到沙州~鱼卡线路继电保护出口信号或断路器位置接点信号, 则闭锁外层控制, 启动电磁暂态控制策略, 将两侧线路可控高抗投至最大容量, 待电磁暂态控制结束后, 转回外层控制。

所述最外层电压控制以变电站母线电压为输入量, 输入最外层电压控制上限

U' , U' 的数值由用户确定; 最外层电压控制实时监测系统电压, 一旦监测到电压高于 U' , 站内两组线路分级式可控高抗立即动作至最大容量, 以抑制系统高压。

所述最外层控制优先级高于外层控制, 外层控制优先级高于内层控制。

与现有技术相比, 本发明的有益效果在于:

1. 本发明的方法直接以电压为控制目标, 物理意义明确, 简单直观。

2. 本发明将连续调压的 FACTS 设备 (包括静止无功补偿器和磁控式母线可控高抗) 与分级动作的线路可控高抗有效协调。当风功率波动引起系统电压变化时, 连续调压设备优先动作, 发挥其跟随调压功能, 将电压精确控制在目标值。当连续调压设备已经调整至最大/最小容量, 变电站电压仍超出控制范围时, 此时分级式线路可控高抗再动作, 将电压控制在合理范围内。控制方法充分发挥 SVC、磁控式母线可控高抗的连续跟随调压功能, 避免了分级式可控高抗的频繁动作, 显著提高各 FACTS 设备的动作精度和利用效率。

3. 本发明采用三层电压控制, 最外层控制优先于外层控制, 外层控制优先于内层控制, 不同的控制层中分级式可控高抗采取不同的动作原则。内层控制中, 每次允许变电站内一组分级式可控高抗动作一级; 外层控制中, 每次允许变电站内两组分级式可控高抗同时动作一级; 最外层控制中, 每次允许变电站内两组分级式可控高抗同时动作至最大容量。采取不同的分级式可控高抗动作原则, 既可以在内层控制时减少可控高抗的动作频度和对系统的冲击, 又可以在外层控制和最外层控制时为系统提供紧急无功支撑。三层控制相结合的方法使得可控高抗动作合理性显著提高, 为可控高抗在大规模新能源外送的输电系统中发挥作用提供了保障, 具有广阔的应用前景。

附图说明

图 1 是新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法示意图;

图 2 是本发明实施例中沙州站外层控制策略示意图;

图 3 是本发明实施例中鱼卡站外层控制策略示意图;

图 4 是本发明实施例中沙州站最外层控制策略示意图;

图 5 是本发明实施例中鱼卡站最外层控制策略示意图;

图 6 是本发明实施例中新疆与西北主网联网第二通道示意图；

图 7 是本发明实施例中 2013 年夏大方式下风电均匀波动时沙州侧线路可控高抗动作图；

图 8 是本发明实施例中 2013 年夏大方式下风电均匀波动时鱼卡侧线路可控高抗动作图；

图 9 是本发明实施例中 2013 年夏大方式下风电均匀波动时沙州 SVC 动作图；

图 10 是本发明实施例中 2013 年夏大方式下风电均匀波动时鱼卡母线可控高抗动作图；

图 11 是本发明实施例中 2013 年夏大方式下风电均匀波动时沙州站和鱼卡站 750kV 侧电压变化图(kV)；

图 12 是本发明实施例中 2013 年夏大基础方式下敦煌~酒泉线路 N-2 故障后沙州站电压变化图(kV)；

图 13 是本发明实施例中 2013 年夏大基础方式下敦煌~酒泉线路 N-2 故障后鱼卡站电压变化图(kV)；

图 14 是本发明实施例中 2013 年冬大极限方式下甘肃风电脱网后沙州站电压变化图(kV)；

图 15 是本发明实施例中 2013 年冬大极限方式下甘肃风电脱网后鱼卡站电压变化图(kV)。

具体实施方式

下面结合附图对本发明作进一步详细说明。

如图 1，本发明提供一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，所述方法包括内层控制、外层控制和最外层控制；所述内层控制将变电站电压精确控制在电压目标值或电压控制带内；在新能源外送系统出现大扰动时外层控制和最外层控制提供紧急无功支撑，使变电站电压能够迅速恢复至允许范围内。

所述内层控制中，内层电压控制每隔 1 分钟循环一次；沙州站和鱼卡站内层控制设置时延 30s，以避免沙州站和鱼卡站线路分级式可控高抗同时动作。

所述内层电压控制以变电站母线电压为输入量，输入沙州站控制电压目标值 V_1 、鱼卡站控制电压目标值 V_2 、沙州母线电压控制带 $[V_1 - \Delta V_1, V_1 + \Delta V_1]$ 和鱼卡

母线电压控制带 $[V_2 - \Delta V_2, V_2 + \Delta V_2]$, ΔV_1 和 ΔV_2 分别为沙州站和鱼卡站允许的母线电压偏差, V_1 、 V_2 、 ΔV_1 和 ΔV_2 的数值由用户确定。

内层电压控制时, 优先发挥沙州静止无功补偿器、鱼卡磁控式可控高抗的跟随式调节作用, 将沙州站电压和鱼卡站电压分别控制在 V_1 和 V_2 ; 当静止无功补偿器、磁控式可控高抗已达到最大/最小容量, 沙州/鱼卡母线电压仍不在电压控制带内, 此时站内的线路可控高抗触发动作; 为减少设备损耗, 可控高抗控制触发时, 沙州站线路可控高抗 I 和 II 交替动作, 鱼卡站线路可控高抗 I 和 II 交替动作, 每次动作一级;

当站内一组线路可控高抗 I 动作一级后, 若监控母线电压仍不在允许电压控制带内时, 则发触发指令给本站另一组线路可控高抗 II, 可控高抗 II 动作一级, 若此时可控高抗 II 故障或已达到最大/最小容量, 则发触发指令给可控高抗 I, 可控高抗 I 再动作一级;

当站内一组线路可控高抗 I 需要动作, 但由于可控高抗 I 自身故障或者已达到最大/最小容量, 则发触发指令给本站另一组线路可控高抗 II, 可控高抗 II 动作一级, 可控高抗 II 动作一级后, 若监控母线电压仍不在允许电压控制带内时, 则可控高抗 II 需要再动作一级。

如图 2 和图 3, 所述外层控制以变电站母线电压为输入量, 输入外层电压上边界 $U1$ 和外层电压下边界 $U2$, 外层电压上边界 $U1$ 和外层电压下边界 $U2$ 由用户确定; 外层控制实时监测电压, 当新能源外送系统中出现大的扰动, 连续 5s 监测到母线电压在 $[U2, U1]$ 之外, 站内两组线路可控高抗 I 和可控高抗 II 同时切除或投入一级容量, 此时静止无功补偿器和磁控式可控高抗在 5s 的监测时间之内已经动态调节完毕, 达到其最大/最小容量, 线路可控高抗动作完毕后, 再开始下一次循环计时;

当发生区内故障时, 即沙州~鱼卡线路故障, 则优先电磁暂态控制; 若 5s 的监测时间之内, 站内协调控制器和线路可控高抗接收到沙州~鱼卡线路继电保护出口信号或断路器位置接点信号, 则闭锁外层控制, 启动电磁暂态控制策略, 将两侧线路可控高抗投至最大容量, 待电磁暂态控制结束后, 转回外层控制。

如图 4 和图 5, 所述最外层电压控制以变电站母线电压为输入量, 输入最外

层电压控制上限 U' ， U' 的数值由用户确定；最外层电压控制实时监测系统电压，一旦监测到电压高于 U' ，站内两组线路分级式可控高抗立即动作至最大容量，以抑制系统高压。

如图 6，所述新能源外送系统为新疆与西北主网联网第二通道，风电和太阳能由联网通道外送，所述联网通道上装设 FACTS 设备；其中，在联网通道沿线的沙州站主变第三绕组侧装设 66kV 静止无功补偿器，在开关站鱼卡母线侧装设磁控式母线可控高抗，在沙州~鱼卡线路双回线路两侧装设分级式可控高抗。

基于 BPA 潮流计算程序进行控制策略仿真计算，考察所提新疆与西北联网第二通道多 FACTS 设备协调控制策略对于电压的控制效果。第二通道联网示意图如图 7 所示。

首先，考察新疆与西北主网联网第二通道多 FACTS 设备内层协调控制策略对于电压的控制效果，计算算例采用 2013 年夏大方式规划数据。设置沙州站、鱼卡站的控制电压目标值 $V_1=775\text{kV}$ ， $V_2=770\text{kV}$ ，沙州母线电压控制带为 $[770\text{kV}, 780\text{kV}]$ ，鱼卡母线电压控制带为 $[765\text{kV}, 775\text{kV}]$ 。考虑敦煌和酒泉风电从 0MW 均匀波动至 3300MW，每 300MW 一级，风电波动时利用青海水电调峰以维持系统的功率平衡。仿真中，风电初始出力 0MW 时，二通道各 FACTS 设备安排发出最大感性无功，即沙州~鱼卡四组线路可控高抗安排在最大容量 390Mvar，沙州站 SVC 安排在感性最大容量 360Mvar，鱼卡站磁控式母线可控高抗安排在最大容量 330Mvar，感性为“+”，容性为“-”。根据所述内层控制策略，沙州站内部两组线路可控高抗动作情况如图 7 所示，鱼卡站内部两组线路可控高抗动作情况如图 8 所示，沙州站 SVC 动作情况如图 9 所示，鱼卡站磁控式母线可控高抗动作情况如图 10 所示。沙州站和鱼卡站 750kV 侧电压变化情况如图 11 所示。从图中可以看出，沙州线路可控高抗 1、可控高抗 2 交替动作，鱼卡可控高抗 1、可控高抗 2 交替动作，可控高抗每次只动作一级。当可控高抗动作后，沙州 SVC、鱼卡磁控式母线可控高抗将出现反向调节，将电压控制在目标值。图 9 中，当风电出力 2400MW、3000MW、3300MW 时，SVC 出现反向调节。图 10 中，当风电出力 1800MW、2400MW 时，磁控式母线可控高抗出现反向调节。

当风电出力 0MW~1500MW 时，仅依靠沙州站 SVC 和鱼卡站磁控式母线可控高抗的跟随调压，能够将沙州站、鱼卡站电压控制在目标值。当风电出力

1800MW，沙州电压在控制范围内，而鱼卡电压低于 765kV，鱼卡一组可控高抗动作一级。当风电出力 2100MW、2700MW 时，沙州一组线路可控高抗动作一级，沙州和鱼卡电压都能恢复到控制范围内，鱼卡线路可控高抗无需动作。当风电出力 2400MW、3300MW 时，沙州可控高抗动作一级后，但鱼卡电压低于 765kV，鱼卡可控高抗动作一级。当风电出力 3000MW 时，沙州一组线路可控高抗动作一级后，沙州电压仍低于 770kV，沙州另一组线路可控高抗再动作一级，沙州电压恢复至控制范围内，鱼卡电压仍低于 765kV，鱼卡一组可控高抗动作一级。采取所述多 FACTS 设备内层协调控制策略，沙州电压能精确控制在 775kV，鱼卡电压在风电波动 0~2400MW 时能精确控制在 770kV，鱼卡电压在风电波动 2700MW~3300MW 时能控制在[765kV，770kV]范围内。

其次，考察新疆与西北主网联网第二通道多 FACTS 设备外层协调控制策略对于电压的控制效果，计算算例采用 2013 年夏大基础方式规划数据。设置外层电压控制的上下边界为默认值，取 $U_1=803\text{kV}$ ， $U_2=745\text{kV}$ 。仿真中，沙州~鱼卡线路两侧四组可控高抗均投入最大容量 390Mvar，沙州 SVC 容量为 0Mvar，鱼卡磁控式母线可控高抗投入最大容量 330Mvar。敦煌~酒泉 N-2 故障后，沙州站、鱼卡站母线电压变化如图 12、13 所示。新疆与西北联网第二通道沿线各站的电压变化如下表 1 所示。故障后沙州电压为 736kV，鱼卡电压为 709kV。考虑 SVC 的跟随调压作用，沙州电压恢复至 750kV，鱼卡电压恢复至 720kV，鱼卡电压仍低于外层电压控制下限 745kV，启动外层控制，鱼卡侧两组线路可控高抗都切除一级，鱼卡电压恢复至 734kV，仍低于 745kV，启动下一轮外层控制，鱼卡侧两组线路可控高抗再切除一级，鱼卡电压恢复至 748kV。

表 1

母线名称	故障前电压 (kV)	故障后电压 (kV)	故障后 SVC 及可控高抗动作后电压 (kV)		
			SVC 动作	SVC 动作后, 鱼卡两组线路可控高抗各切一级	SVC 动作后, 鱼卡两组线路可控高抗连续切两级
敦煌	768.1	745.1	752.7	759.4	761.6
沙州	772.6	735.6	749.5	755.2	760.7
鱼卡	769.1	708.7	720.3	734.3	748.3
柴达木	772.3	707.7	718.9	732	742.7

最后，考察新疆与西北主网联网第二通道多 FACTS 设备最外层协调控制策略对于电压的控制效果，计算算例采用 2013 年冬大极限方式规划数据。其中，

敦煌风电接入 3200MW，酒泉风电接入 1000MW。设置最外层电压控制的上边界为默认值，取 $U'=830\text{kV}$ 。仿真中，沙州 SVC 容量为 0Mvar，沙州~鱼卡线路两侧四组可控高抗均投入容量 156Mvar（固定容量 39Mvar+1 级可控容量 117Mvar）。设置酒泉风电场汇集侧玉门~嘉峪关三永 N-1 故障，模拟故障后甘肃 4200MW 风电全部脱网，沙州站和鱼卡站的电压变化情况如图 14 和图 15 所示。风电脱网后，考虑 SVC 跟随调压作用，沙州和鱼卡最高电压仍达到 830kV 之上，启动最外层控制策略，沙州站和鱼卡站两组线路可控高抗均投至最大容量 390Mvar。可控高抗动作后电压能够恢复至合理范围内，沙州电压恢复至 790kV，鱼卡电压恢复至 790kV。动态无功补偿设备动作后引起的脱网故障后各站电压变化如下表 2 所示。

表 2

电压/(kV)	敦煌	酒泉	沙州	鱼卡	柴达木
初始	768	770	782	787	780
风电脱网后 SVC 和可控高抗均不动作	830	810	840	850	845
风电脱网后仅 SVC 动作	815	800	820	835	835
风电脱网后 SVC 和可控高抗均动作	790	790	790	790	800

最后应当说明的是：以上实施例仅用以说明本发明的技术方案而非对其限制，尽管参照上述实施例对本发明进行了详细的说明，所属领域的普通技术人员应当理解：依然可以对本发明的具体实施方式进行修改或者等同替换，而未脱离本发明精神和范围的任何修改或者等同替换，其均应涵盖在本发明的权利要求范围当中。

权 利 要 求

1.一种新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述方法包括内层控制、外层控制和最外层控制；所述内层控制将变电站电压精确控制在电压目标值或电压控制带内；在新能源外送系统出现大扰动时外层控制和最外层控制提供紧急无功支撑，使变电站电压能够迅速恢复至允许范围内。

2.根据权利要求 1 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述新能源外送系统为新疆与西北主网联网第二通道，风电和太阳能由联网通道外送，所述联网通道上装设 FACTS 设备；其中，在联网通道沿线的沙州站主变第三绕组侧装设 66kV 静止无功补偿器，在鱼卡开关站母线侧装设磁控式母线可控高抗，在沙州～鱼卡双回线路两侧装设分级式可控高抗。

3.根据权利要求 1 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述内层控制中，内层电压控制每隔 1 分钟循环一次；沙州站和鱼卡站内层控制设置时延 30s，以避免沙州站和鱼卡站线路分级式可控高抗同时动作。

4.根据权利要求 3 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述内层电压控制以变电站母线电压为输入量，输入沙州站控制电压目标值 V_1 、鱼卡站控制电压目标值 V_2 、沙州母线电压控制带 $[V_1 - \Delta V_1, V_1 + \Delta V_1]$ 和鱼卡母线电压控制带 $[V_2 - \Delta V_2, V_2 + \Delta V_2]$ ， ΔV_1 和 ΔV_2 分别为沙州站和鱼卡站允许的母线电压偏差， V_1 、 V_2 、 ΔV_1 和 ΔV_2 的数值由用户确定。

5.根据权利要求 4 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：内层电压控制时，优先发挥沙州静止无功补偿器、鱼卡磁控式可控高抗的跟随式调节作用，将沙州站电压和鱼卡站电压分别控制在 V_1 和 V_2 ；当静止无功补偿器、磁控式可控高抗已达到最大/最小容量，沙州/鱼卡母线电压仍不在电压控制带内，此时站内的线路可控高抗触发动作；为减少设备损耗，可控高抗控制触发时，沙州站线路可控高抗 I 和 II 交替动作，鱼卡站线路可控高抗 I 和 II 交替动作，每次动作一级；

当站内一组线路可控高抗 I 动作一级后，若监控母线电压仍不在允许电压控制带内时，则发触发指令给本站另一组线路可控高抗 II，可控高抗 II 动作一级，若此时可控高抗 II 故障或已达到最大/最小容量，则发触发指令给可控高抗 I，可

控高抗 I 再动作一级；

当站内一组线路可控高抗 I 需要动作，但由于可控高抗 I 自身故障或者已达到最大/最小容量，则发触发指令给本站另一组线路可控高抗 II，可控高抗 II 动作一级，可控高抗 II 动作一级后，若监控母线电压仍不在允许电压控制带内时，则可控高抗 II 需要再动作一级。

6.根据权利要求 1 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述外层控制以变电站母线电压为输入量，输入外层电压上边界 U_1 和外层电压下边界 U_2 ，外层电压上边界 U_1 和外层电压下边界 U_2 由用户确定；外层控制实时监测电压，当新能源外送系统中出现大的扰动，连续 5s 监测到母线电压在 $[U_2, U_1]$ 之外，站内两组线路可控高抗 I 和可控高抗 II 同时切除或投入一级容量，此时静止无功补偿器和磁控式可控高抗在 5s 的监测时间之内已经动态调节完毕，达到其最大/最小容量，线路可控高抗动作完毕后，再开始下一次循环计时；

当发生区内故障时，即沙州～鱼卡线路故障，则优先电磁暂态控制；若 5s 的监测时间之内，站内协调控制器和线路可控高抗接收到沙州～鱼卡线路继电保护出口信号或断路器位置接点信号，则闭锁外层控制，启动电磁暂态控制策略，将两侧线路可控高抗投至最大容量，待电磁暂态控制结束后，转回外层控制。

7.根据权利要求 1 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述最外层电压控制以变电站母线电压为输入量，输入最外层电压控制上限 U' ， U' 的数值由用户确定；最外层电压控制实时监测系统电压，一旦监测到电压高于 U' ，站内两组线路分级式可控高抗立即动作至最大容量，以抑制系统高压。

8.根据权利要求 1 所述的新能源外送系统的 FACTS 设备协调控制方法，其特征在于：所述最外层控制优先级高于外层控制，外层控制优先级高于内层控制。

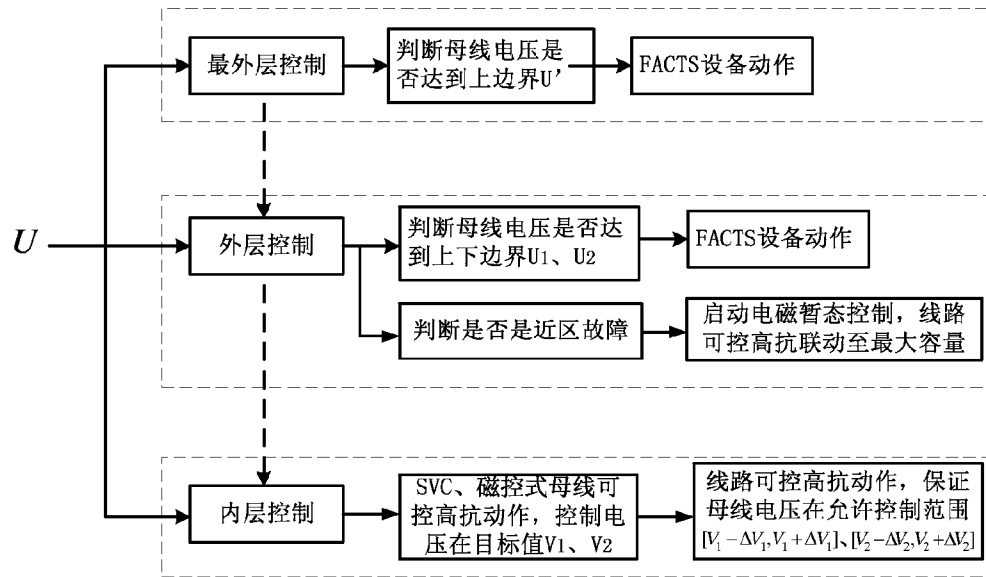


图 1

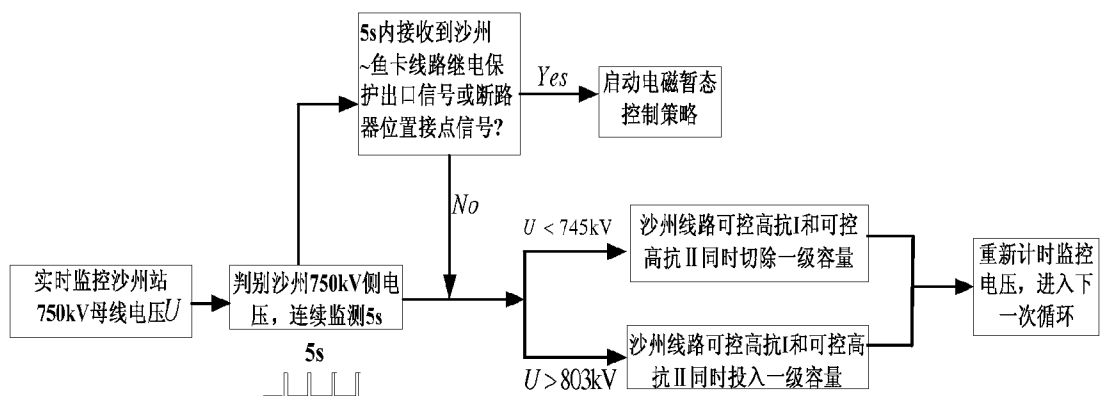


图 2

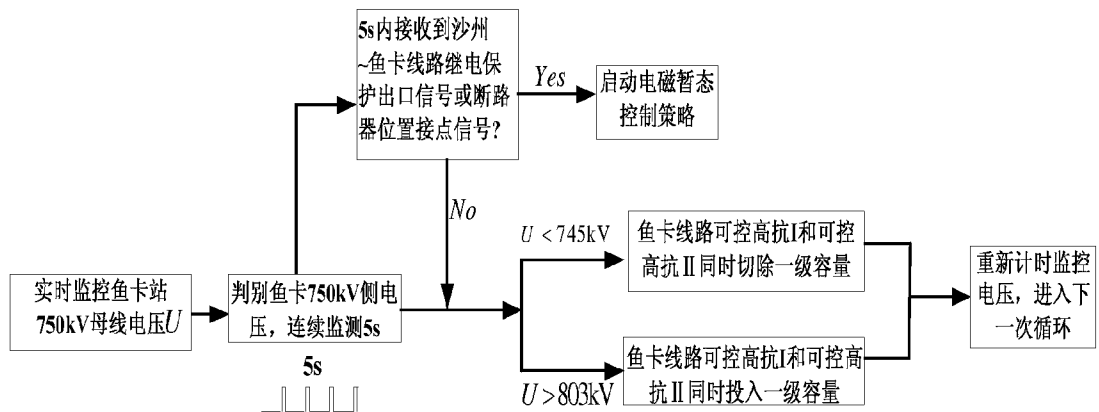


图 3

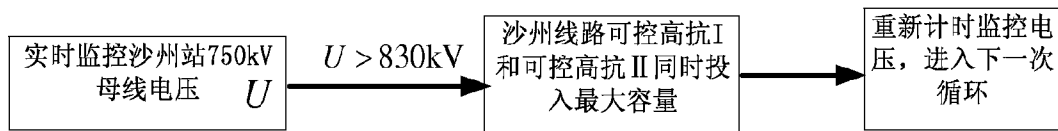


图 4

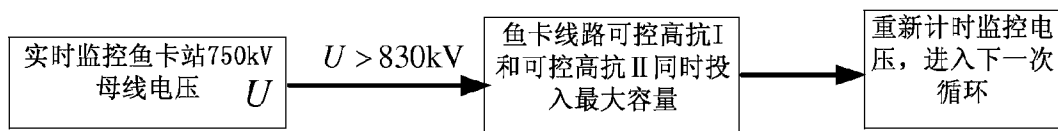


图 5

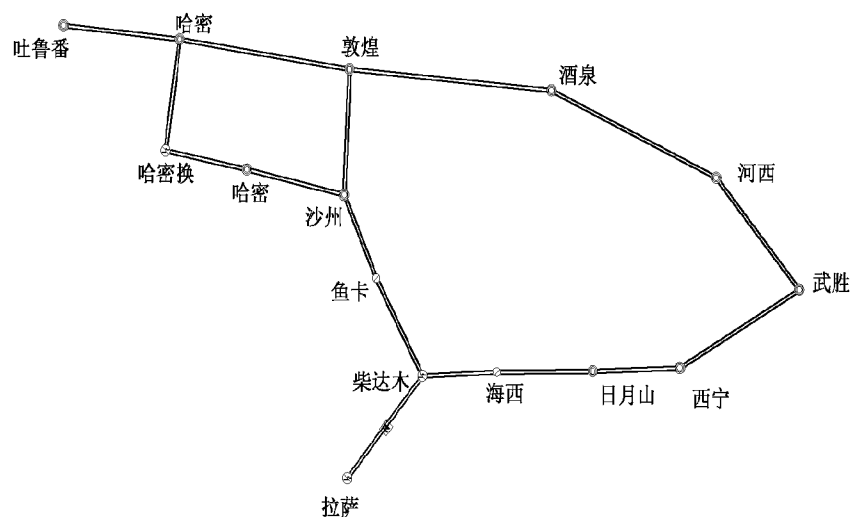


图 6

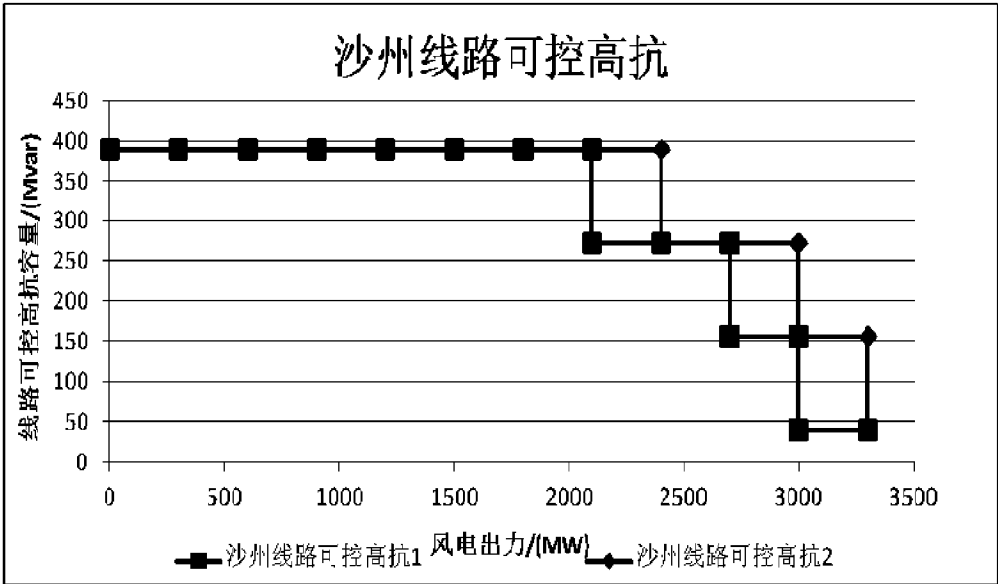


图 7

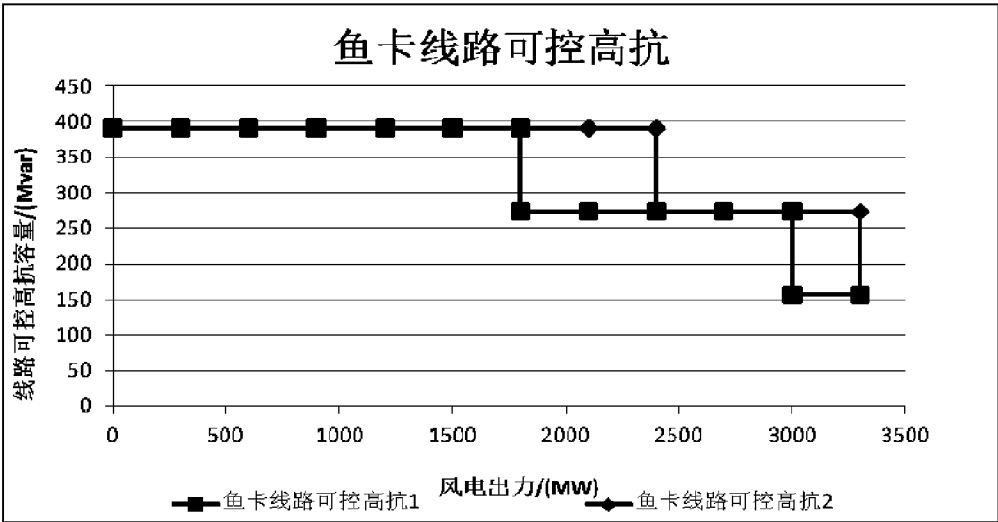


图 8

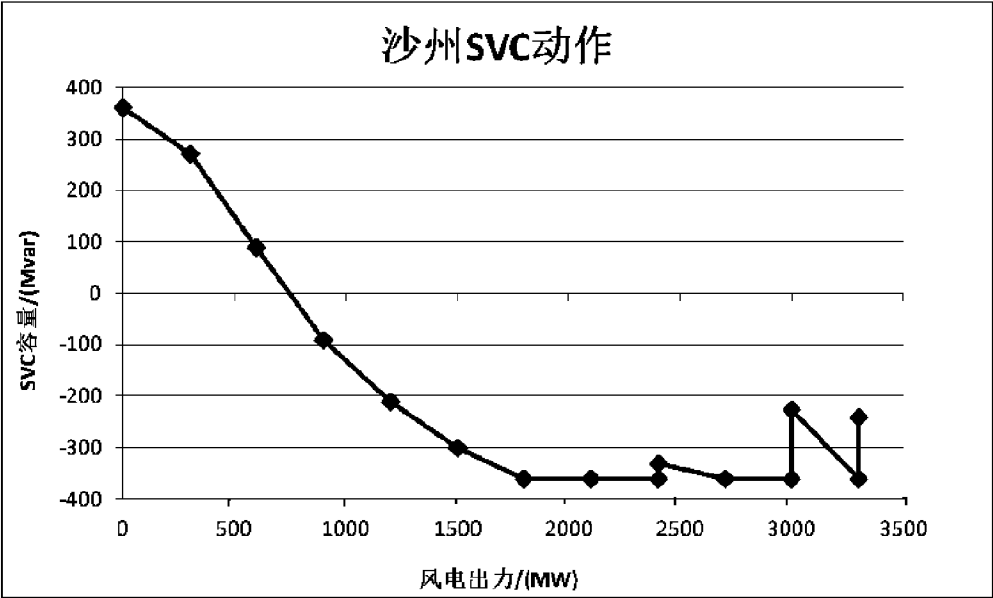


图 9

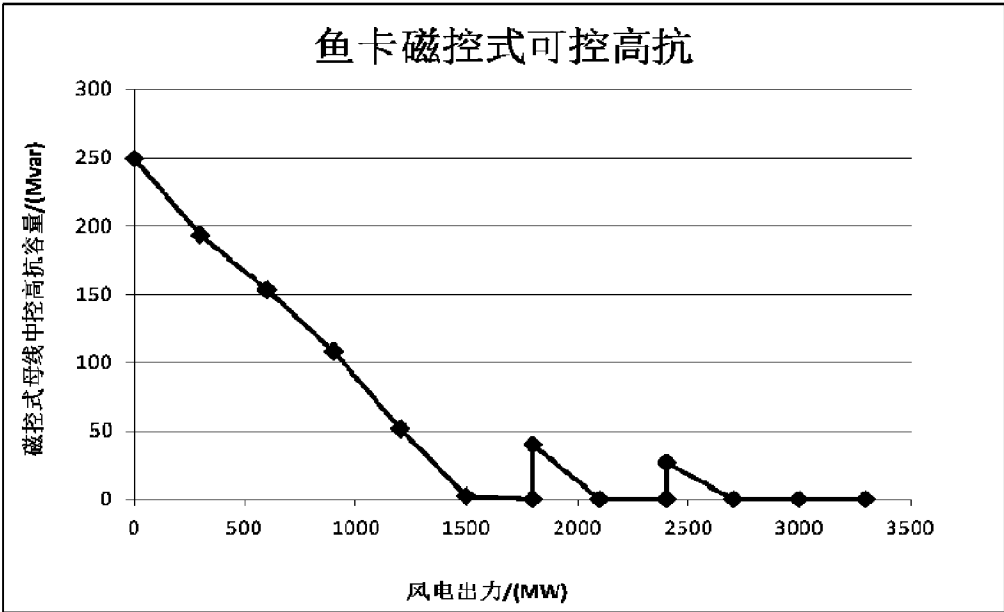


图 10

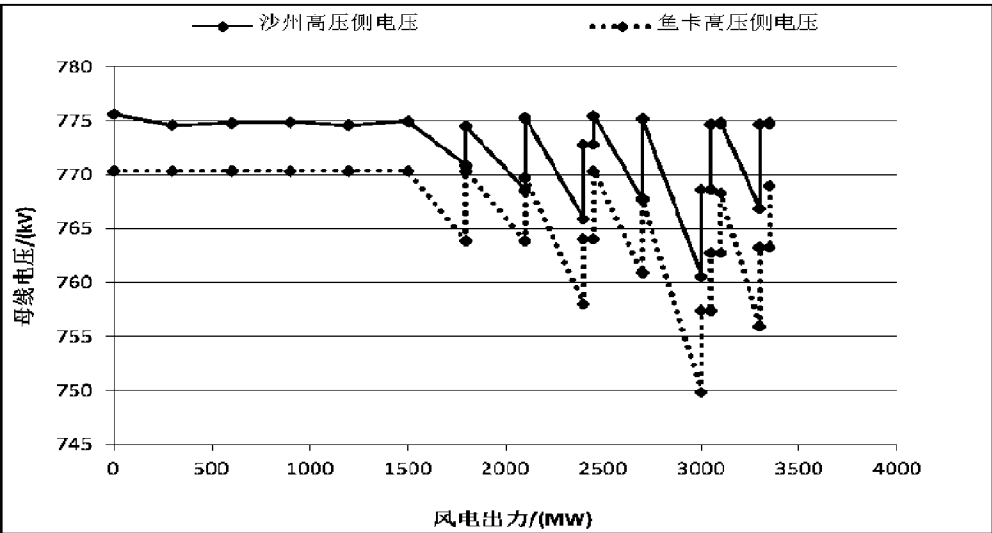


图 11

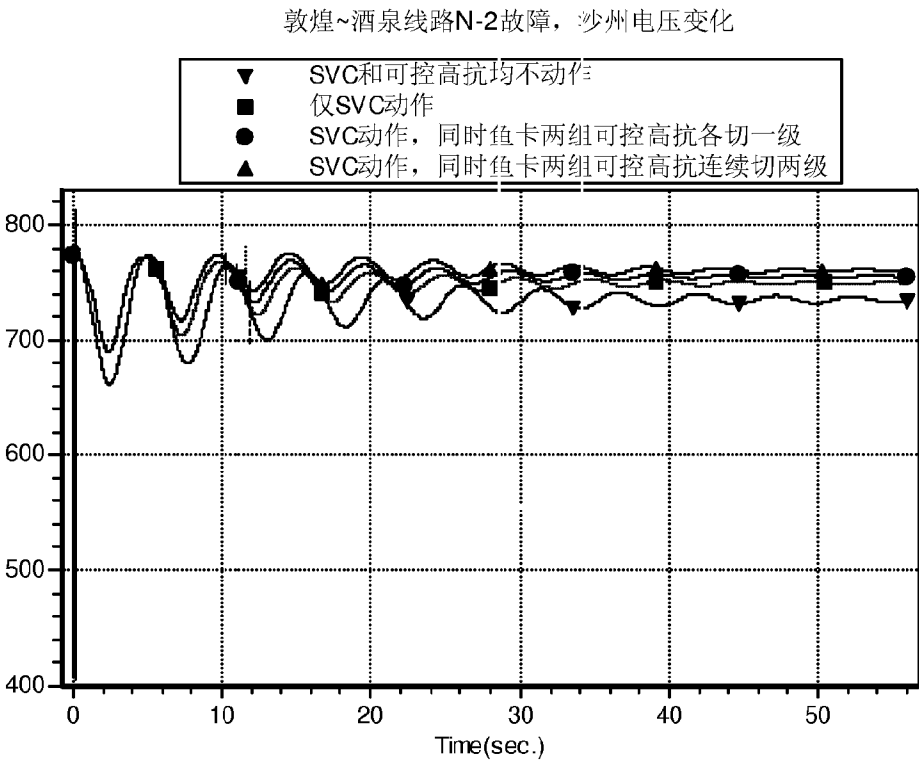


图 12

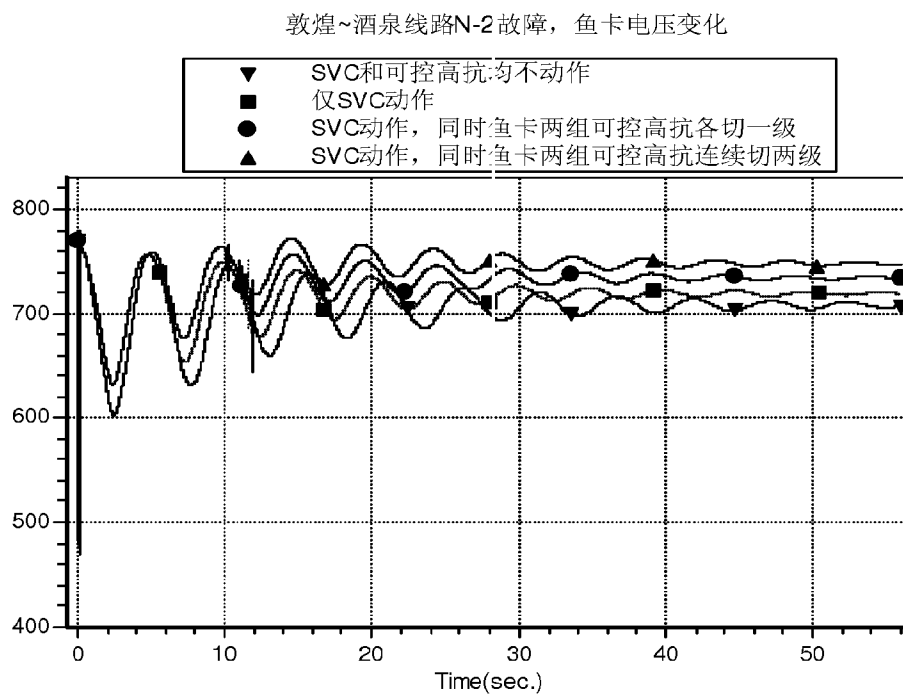


图 13

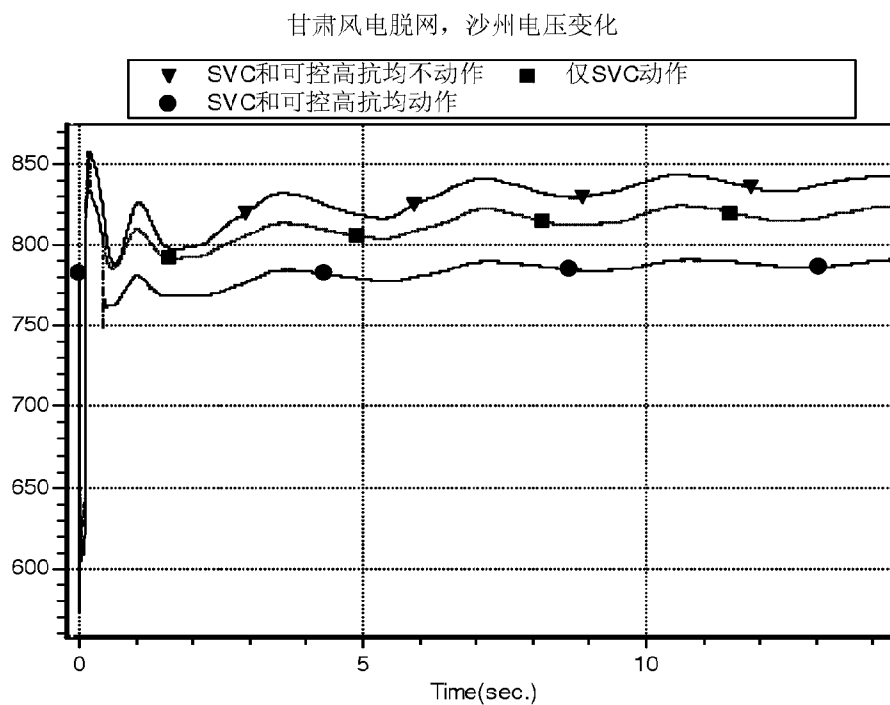


图 14

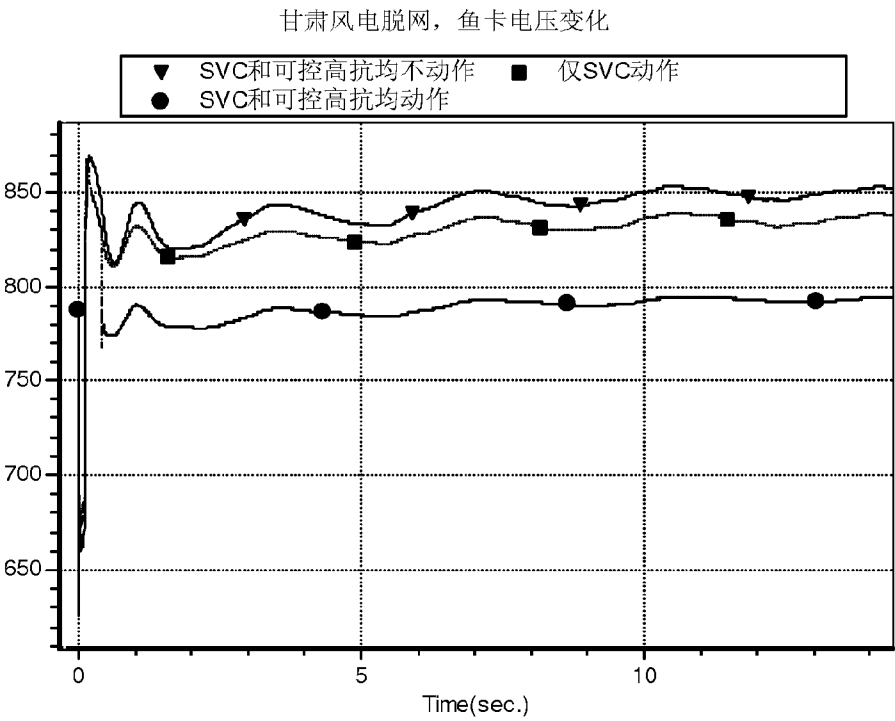


图 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2013/084261

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H02J 3/12 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC: H02J

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
CNPAT, CNKI, WPI, EPODOC, IEEE: fall, alternating, VOLTAGE, DISTURB+, FLUCTUAT+, REACTIVE W POWER, COMPENSAT+, SUPPORT, FLEXIBLE, AC, TRANSMI+, FACTS

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN 102904287 A (CHINA ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE et al.), 30 January 2013 (30.01.2013), description, paragraphs 0037-0057	1-8
X	CN 102611118 A (TSINGHUA UNIVERSITY), 25 July 2012 (25.07.2012), description, paragraphs 0082-0142, and figures 1-3	1, 3, 8
A		2, 4-7
A	CN 101521381 A (SHANGHAI NAJIE COMPLETE ELECTRIC CO., LTD.), 02 September 2009 (02.09.2009)	1-8
A	CN 201611785 U (SUN, Yong), 20 October 2010 (20.10.2010), the whole document	1-8

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	"&" document member of the same patent family
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search 06 December 2013 (06.12.2013)	Date of mailing of the international search report 02 January 2014 (02.01.2014)
Name and mailing address of the ISA/CN: State Intellectual Property Office of the P. R. China No. 6, Xitucheng Road, Jimenqiao Haidian District, Beijing 100088, China Facsimile No.: (86-10) 62019451	Authorized officer LI, Nan Telephone No.: (86-10) 62413690

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2013/084261

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN 102904287 A	30.01.2013	None	
CN 102611118 A	25.07.2012	None	
CN 101521381 A	02.09.2009	None	
CN 201611785 U	20.10.2010	None	

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2013/084261

A. 主题的分类

H02J 3/12 (2006.01)i

按照国际专利分类(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: H02J

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用))

CNPAT, CNKI, WPI, EPDOC, IEEE: 电压, 扰动, 波动, 跌落, 无功, 补偿, 支撑, 柔性, 交流, 输电, VOLTAGE, DISTURB+, FLUCTUAT+, REACTIVE W POWER, COMPENSAT+, SUPPORT, FLEXIBLE, AC, TRANSMI+, FACTS

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN 102904287 A (中国电力科学研究院等) 30.1 月 2013 (30.01.2013) 说明书第 0037-0057 段	1-8
X	CN 102611118 A (清华大学) 25.7 月 2012 (25.07.2012) 说明书第 0082-0142 段、附图 1-3	1、3、8
A		2、4-7
A	CN 101521381 A (上海纳杰电气成套有限公司) 02.9 月 2009 (02.09.2009)	1-8
A	CN 201611785 U (孙勇) 20.10 月 2010 (20.10.2010) 全文	1-8

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件(如具体说明的)

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期
06.12 月 2013(06.12.2013)

国际检索报告邮寄日期
02.1 月 2014 (02.01.2014)

ISA/CN 的名称和邮寄地址:
中华人民共和国国家知识产权局
中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088
传真号: (86-10)62019451

受权官员

李楠
电话号码: (86-10) **62413690**

国际申请号
PCT/CN2013/084261

PCT/ISA/210 表(同族专利附件) (2009 年 7 月)