

基于协同进化算法的配电网故障阶段式恢复策略

汤亚芳¹, 陈曦², 程浩忠²

- (1. 贵州大学 电气工程学院, 贵州省 贵阳市 550003;
2. 上海交通大学 电子信息与电气工程学院, 上海市 闵行区 200240)

A Phased Fault Restoration Algorithm for Distribution System Based on Co-Evolutionary Algorithm of PSO and SA

TANG Ya-fang¹, CHEN Xi², CHENG Hao-zhong²

- (1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, Guizhou Province, China; 2. School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Minhang District, Shanghai 200240, China)

ABSTRACT: For traditional distribution network fault restoration algorithm, it is difficult to consider both the quickness of restoration process and optimization of restoration strategy simultaneously. The authors propose a phased distribution network fault restoration method that integrates the heuristic search algorithm with optimization algorithm. In the first stage, the heuristic search algorithm is adopted to restore power supply for loads; in the second stage, the optimization algorithm is adopted to deal with load transfer under overload; in the third stage, the overload is rejected according to the heuristic search algorithm. To implement quick network topology and analysis, the wiring of distribution network is characterized by family tree structure; traditional particle swarm optimization (PSO) algorithm and simulated annealing (SA) algorithm are improved, and a coevolution algorithm of PSO and SA (CPSOSA) is put forward, CPSOSA possesses higher global search ability while fault restoration model is solved. The feasibility and efficiency of the proposed restoration strategy and algorithm are verified by results of calculation example.

KEY WORDS: distribution systems; fault restoration; family tree; co-evolution algorithm of PSO and SA (CPSOSA)

摘要: 传统的配电网故障恢复算法难于同时兼顾恢复过程的快速性和恢复策略的最优化。文章提出一种将启发式搜索算法与优化算法相结合的配电网故障阶段式恢复策略: 第一阶段采用启发式搜索方法恢复负荷供电; 第二阶段利用优化算法处理过载的负荷转移; 第三阶段按启发式搜索方法处理过载负荷的切除。为实现快速的网络拓扑分析, 采用家族树结构表征配电网, 并对传统的粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法与模拟退火(simulated annealing, SA)优化算法进行改进, 提出了协同进化算法(co-evolutionary

algorithm of PSO and SA, CPSOSA), CPSOSA 算法在求解故障恢复数学模型时具有较高的全局寻优能力。算例分析证明了本文所提恢复策略及算法的可行性和高效性。

关键词: 配电网; 故障恢复; 家族树结构; 粒子群优化与模拟退火协同进化算法(CPSOSA)

0 引言

配电网故障恢复是一个多目标多约束的问题, 难以用传统数学方法求解。目前的求解方法可分为两类: ①数学优化法, 即根据故障恢复的目标和约束构建目标函数, 利用优化算法对目标函数求解; ②启发式搜索法, 即搜索满足启发式规则的各种恢复路径, 比较搜索结果, 优选出开关操作的组合。

目前常用的优化算法有传统优化算法和人工智能优化算法。传统优化算法有规划类算法^[1]、Petri网算法^[2]; 人工智能优化算法有遗传算法^[3]、粒子群算法^[4]等。数学优化方法的最大优点在于只要构建的目标函数一定, 就能以一定的概率找到最优解, 但该类解法迭代和搜索次数较多, 实时性不强, 特别对简单网络不能体现出优势。

常用的启发式搜索算法有专家系统^[5]、分级搜索法^[6-7]、基于变结构耗散网络的算法^[8]、基于树结构的搜索法^[9]等。该类算法的实时性较好, 但是对于复杂网络很难得到全局最优方案, 同时启发式搜索方法在处理约束条件时有局限性。

本文提出一种基于家族树结构的启发式搜索和优化算法相结合的配电网故障阶段式恢复策略, 并以 IEEE-69 节点配电网为算例, 比较协同进化优化算法(co-evolutionary algorithm of PSO and SA,

CPSOSA)、粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法以及模拟退火(simulated annealing, SA)算法的迭代效率和全局搜索能力, 以验证基于CPSOSA 优化算法的阶段式恢复策略的高效性。

1 配电网拓扑的家族树表示法

快速的网络拓扑分析可以提高故障恢复的速度。由于配电网在正常运行情况下总是开环运行, 在故障恢复中常用树结构来表示其网络连接^[10-11]。本文对传统树结构进行改进, 提出用一种家族树形式来表征配电网, 这种树结构能实现网络的快速搜索且能根据网络的变化快速修正网络拓扑。

传统的树状结构配电网拓扑见图 1, 其中 S 为电源节点, 节点 1~12 为分段开关, 正常状态是闭合的; A 和 B 是联络开关节点, 正常状态是断开的。图 2 是家族树结构表示的配电网, 从图中可见家族树结构中的每个节点只有一个对应的子节点, 如对节点 S, 只有 1 是其子节点。节点 2 和 3 称为节点 1 的兄弟节点, 它们之间的关系可用“之后”和“之前”来表示。兄弟节点的父节点都是相同的, 如节点 1、2、3 的父节点都是 S。规定所有的联络开关都应作为家族树的边界子节点。一般是从父节点开始树的搜索, 通过一个搜索子节点和兄弟节点的循环搜索算法即可建立家族树结构, 通过调用一个搜索父节点的循环算法可以实现向上的搜索。

当配电网出现故障时, 该家族树结构可以快速

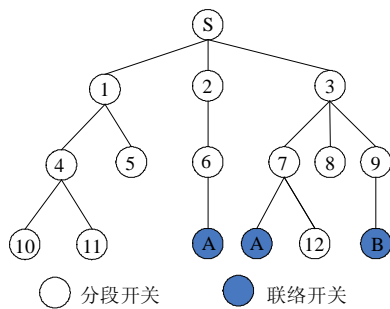


图 1 配电网拓扑的传统树结构形式

Fig. 1 Traditional tree of distribution network

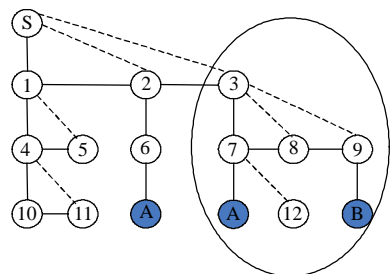


图 2 配电网拓扑的家族树结构形式

Fig. 2 Family tree of distribution network

划定停电区域的范围, 搜索到可供闭合的联络开关, 并对联络开关闭合后网络的拓扑进行修正。例如如图 2 中的节点 S 到 3 之间的线路出现故障时, 根据故障信息判断节点 3 失去了父节点, 则从节点 3 开始的分支树就是停电孤岛(圆圈划出的区域), 在该孤岛的边界处找到所有可供选择的联络开关(即 A 和 B)。若此时合上开关 A, 则从 A 开始对停电孤岛进行父节点的搜索, 并将父子关系倒置, 就重新建立了停电孤岛的分支树结构, 将该分支树添加到与之有相同标记的联络开关处即可完成修正过程。

这种家族树结构的优点是: 一旦配电网结构出现变化, 只需对相应分支树的父子节点进行关系倒置操作即可完成网络的重新拓扑。由于操作的节点数目较少, 该结构可加快网络拓扑分析的速度, 从而增强故障恢复的实时性。

2 配电网故障恢复的数学模型及 CPSOSA 算法

2.1 配电网故障恢复数学模型

本文以开关操作次数、负荷均衡指数(load balance index, LBI)和有功网损为目标建立故障恢复数学模型, 即

$$\min f = I_1 f_{\text{switch}} + I_2 f_{\text{LBI}} + I_3 f_{\text{P,loss}} \quad (1)$$

$$\text{s.t. } g_k \in G_k$$

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max}$$

$$S_i \leq S_{i\max}$$

式中: I_1 、 I_2 和 I_3 为多目标的权重系数, 满足 $I_1 + I_2 + I_3 = 1$; f_{switch} 为开关次数目标函数; f_{LBI} 为负荷均衡指数目标函数; $f_{\text{P,loss}}$ 为有功网损目标函数; g_k 为当前网络结构; G_k 为所有允许的放射状网络结构; U_i 为节点 i 的电压模值, U_{\max} 和 U_{\min} 分别为该节点电压的上、下限; S_i 和 $S_{i\max}$ 分别为支路 i 的实际传输容量和输送容量限额。

开关操作次数目标^[7]表示为

$$\min f_{\text{switch}} = \sum_{i=1}^m (1 - y_i) + \sum_{j=1}^n Z_j \quad (2)$$

式中: y_i 为故障前非故障断电区中闭合的分段开关 i 在重构中的变化情况; Z_j 为与非故障断电区相连的常开联络开关 j 在重构中的变化情况。且有

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{分段开关 } i \text{ 在重构中保持闭合} \\ 0, & \text{分段开关 } i \text{ 在重构中变为打开} \end{cases}$$

$$Z_j = \begin{cases} 1, & \text{联络开关 } j \text{ 在重构中变为闭合} \\ 0, & \text{联络开关 } j \text{ 在重构中保持打开} \end{cases}$$

负荷均衡指数目标表示为

$$\min f_{LBI} = \frac{1}{n_b} \sum_{i=1}^{n_b} \frac{S_{Li}}{S_{i\max}} \quad (3)$$

式中： n_b 为闭合的支路数； S_{Li} 和 $S_{i\max}$ 分别为支路*i*的实际负荷和最大传输容量。

网损目标表示为

$$\min f_{P,\text{loss}} = \sum_{i=1}^{n_b} I_i^2 r_i \quad (4)$$

式中： r_i 为支路*i*的电阻； I_i 为支路*i*的电流。

在求解优化模型过程中，将如下的节点电压和线路容量约束条件作为罚项加入目标函数中。

$$K_1(U_i) = \begin{cases} k_{p1}(U_i - U_{i\min})^2, & U_i < U_{i\min} \\ k_{p1}(U_i - U_{i\max})^2, & U_i > U_{i\max} \end{cases} \quad (5)$$

$$K_2(S_i) = \begin{cases} k_{p2}(S_i - S_{i\max})^2, & S_i > S_{i\max} \\ 0, & S_i \leq S_{i\max} \end{cases} \quad (6)$$

式中 k_{p1} 和 k_{p2} 作为对方案偏离运行极限的惩罚因子，一般取值很大。

2.2 CPSOSA 算法

粒子群优化(particle swarm optimization, PSO)算法采用多点并行搜索，各微粒可根据自身和群体所经历的最好位置动态调整当前飞行速度，从而快速地逼近两者的加权中心。但是粒子群一旦陷入局部最优邻域以后就很难再搜索其他区域，导致这一点的关键原因是：①最小值粒子缺乏自主进化机制，对于该粒子，由于认知学习和社会学习部分为零，因而表现出搜索停滞现象；②各粒子缺乏变异机制，且最小值粒子对各粒子的吸引较强，在提高计算速度的同时易导致算法陷入局部最优。为此本文采用基于 PSO 与模拟退火(simulated annealing, SA)算法的协同进化算法求解故障恢复的数学模型，具体流程如图 3 所示。图中： P_i 为粒子*i*的最优位置； P_g 为有最优适配值的粒子的最优位置； K_P 用于记录每次粒子群更新的次数； K_S 用于记录爬山搜索的步数； g_{best} 为 P_g 的目标函数值。

$K_{P,\max}$ 和 $K_{S,\max}$ 为 CPSOSA 算法的关键参数。其中 $K_{P,\max}$ 是判断是否对最优粒子进行退火操作的阈值，一旦粒子群陷入某一局部最优邻域中停滞进化 $K_{P,\max}$ 代，并且不满足收敛条件，即对粒子群执行爬山搜索(即退火操作)。 $K_{S,\max}$ 是每次爬山搜索的最大步数，若在第 $K_S(K_S < K_{S,\max})$ 步时最优粒子得到了进化则立刻从爬山搜索程序块中跳出，若执行了 $K_{S,\max}$ 步之后最优粒子仍未进化，也退出爬山搜索

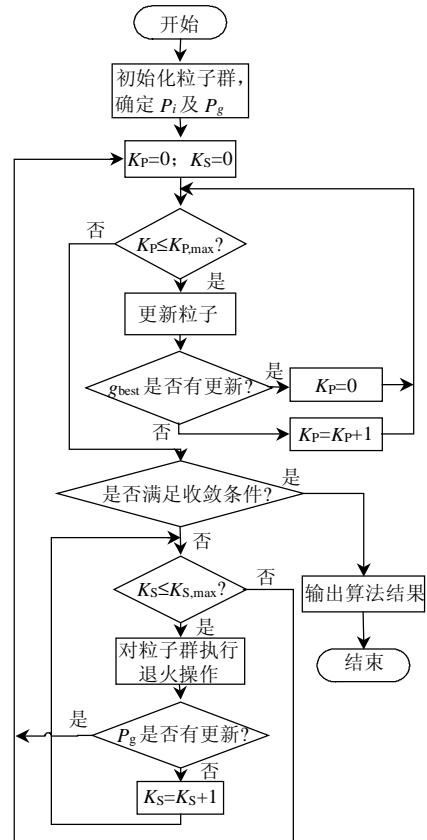


图 3 CPSOSA 算法流程

Fig. 3 Flow chart of CPSOSA algorithm

程序块。CPSOSA 算法在搜索不同的寻优空间时可以通过调节 $K_{S,\max}$ 的值使算法的全局寻优能力得到适当调整，从而使算法更具有灵活性和实用性。

为保证由优化算法搜索到的解都能满足放射状连通性约束，本文采用生成树方法^[12]产生初始解，并对用于配电网重构的粒子群优化算法的更新规则作了改进^[13]，以保证在故障恢复求解过程中始终满足放射状连通性约束。

3 配电网故障阶段式恢复策略

配电网故障阶段式恢复算法包括如下内容：

(1) 搜索停电孤岛。

根据故障信息找到失去父节点的子节点，从该节点开始的分支树便为停电孤岛。

(2) 恢复负荷供电(第一阶段，单开关恢复)。

1) 建立待恢复方案解集。采用子节点和兄弟节点搜索算法搜索到停电分支树的所有边界子节点，找到其中的联络开关，建立备选开关(节点)集。

2) 找出待恢复方案解集中的最优方案。对每一个备选开关方案执行合备选开关、修正网络家族树结构、执行潮流计算程序的操作，若所有方案均满足节点电压和线路容量的约束，则将网损最小的

方案作为最终方案，转到(5)。若解集中的所有方案均有过载现象，则找出过载最少的方案，继续执行步骤(3)。

(3) 过载负荷转移(第二阶段，多开关恢复)。

利用 CPSOSA 算法对故障恢复的数学模型求解，找到实现负荷转移最优的开关操作组合。为减小非故障区域用户受恢复重构的影响及降低 CPSOSA 算法优化变量的维数，加快恢复优化算法的求解速度，处理负荷转移时只对恢复区域的分段开关进行断开操作，对单开关恢复方案中的联络开关进行闭合操作。如果重构结果能完全消除过载，则转到(5)；若仍存在过载分支树，则继续执行(4)。

(4) 过载负荷切除(第三阶段，单开关切除过载负荷)。

1) 建立负荷切除方案解集。从过载分支树某一边界子节点开始执行父向及兄弟节点的搜索，记录搜索过的节点负荷及对应的负荷优先等级。当累加节点负荷之和与过流量接近时，停止搜索过程。记录最后搜索到的父节点，该父节点为备选的切负荷分段开关。接着从另一边子节点开始执行同样的搜索。当所有的搜索过程结束时，便建立了备选切除负荷方案集。

2) 找出待恢复方案解集中的最优方案。计算各备选方案中的负荷综合优先级别，选取级别最低的为最优方案，断开相应方案的分段开关。本文对每个负荷点均标记了负荷优先等级(取值 1~3)，对于 n 个负荷点，其综合优先级别可通过式(7)计算。

$$L_{P\Sigma} = \frac{\sum_{i=1}^n L_{P_i} P_i}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (7)$$

式中： P_i 为节点 i 的有功负荷； L_{P_i} 为节点 i 的负荷优先级别。

(5) 搜索过程停止，得到恢复方案。

4 算例分析

本文采用 VC++ 程序编制了故障恢复算法，采用 IEEE 的 69 节点配电网算例^[14]进行试算。为验证阶段式恢复策略的有效性，本文对 3 个故障点进行恢复重构计算，具体恢复方案见表 1。可见对不同的故障地点，故障恢复策略采用不同阶段的恢复手段：当故障支路为 15-16 时，通过单开关恢复供电操作即可实现故障恢复；当故障支路为 9-10 时，单开关恢复方案会出现线路过载，需采用优化算法实现过载负荷转移；当故障支路为 5-6 时，通过单开关操作和过载负荷转移后仍存在过载现象，说明系

表 1 故障恢复计算结果

Tab. 1 The results of fault restoration

恢复策略	故障点	恢复方案
一阶段 恢复供电	15-16 支路	合 13-20 支路
二阶段 恢复供电	9-10 支路	第一阶段：合 11-66 支路 第二阶段：合 54-27 支路，断 20-21 支路
三阶段 恢复供电	5-6 支路	第一阶段：合 39-48 支路 第二阶段：合 69-15、11-66 支路， 断 10-11、14-15 支路 第三阶段：断 53-54 支路

统线路的备用容量小于失电负荷，只能通过切除负荷保证满足线路容量的约束。

为验证 CPSOSA 算法及其阶段式恢复策略的高效性，本文以算例网络 9-10 支路发生故障为例，分别采用 PSO、SA 以及 CPSOSA 算法进行恢复重构计算，并将本文提出的阶段式恢复策略与直接采用优化算法进行恢复重构的结果进行比较，每种计算方案分别运行 50 次，结果见表 2。

表 2 算法效率比较

Tab. 2 The efficiency of different algorithms

比较项目	PSO 分阶段	SA 分阶段	CPSOSA 分阶段	CPSOSA 直接重构
收敛于最优解的次数	35	44	48	48
平均迭代次数	9.5	37.3	12.4	21.1
第一次达到最优解的 最少迭代次数	7	16	3	8

由表 2 可见，采用阶段式恢复策略所需的迭代次数比直接的优化算法明显减少，在实时性上优势明显。同时可看出 CPSOSA 算法收敛于最优解的次数是最多的，验证了 CPSOSA 算法全局搜索能力强的优点，其代价是引入了退火操作，使其在平均迭代次数上较 PSO 算法略有增加。与 SA 算法相比，CPSOSA 算法在全局搜索能力上略胜一筹，并且在计算速度上具有明显的优势。

5 结论

(1) 阶段式故障恢复方法针对不同的网络和不同的故障点均有较好的实时性：在用优化算法处理故障恢复模型之前，先用启发式搜索算法进行单开关恢复，这相当于对负荷转移阶段的故障恢复模型的优化变量作了降维处理，加快了优化求解的速度。对结构简单的配电网，通过第一和第三阶段即可恢复供电，避免了复杂的搜索和迭代过程；对结构复杂的配电网，线路间的联络较多，通过启发式搜索难以得到最优解，则需采用第二阶段的优化算法。采用家族树结构表征配电网的网络拓扑，进一步加快了故障恢复算法的处理速度。

(2) 在故障恢复的负荷转移处理中利用 CPSOSA 优化算法提高了恢复过程的寻优能力。

(3) 阶段式故障恢复策略多次采用了启发式搜索算法, 导致最终的恢复方案并非全局最优。但是该策略在满足故障恢复所有约束条件的情况下实现了开关操作次数最少、非故障区域受恢复重构的影响最小, 同时 CPSOSA 的爬山能力也使最终求得方案是可接受的次优解。

参考文献

- [1] Chen C S, Cho M Y. Determination of critical switches in distribution system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(3): 1443-1449.
- [2] Wu J S. A Petri-net algorithm for multiple contingencies of distribution system operation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13(3): 1164-1171.
- [3] 刘蔚, 韩祯祥. 基于最优流法和遗传算法的配电网重构[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 29-33.
Liu Wei, Han Zhenxiang. Distribution network reconfiguration based on optimal flow pattern algorithm and genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 29-33(in Chinese).
- [4] 卢志刚, 董玉香. 基于改进二进制粒子群算法的配电网故障恢复[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(24): 39-43
Lu Zhigang, Dong Yuxiang. Distribution system restoration based on improved binary particle swarm optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(24): 39-43(in Chinese).
- [5] 葛朝强, 唐国庆, 王磊. 综合智能式的故障恢复专家系统[J]. 电力系统自动化, 2000, 25(1): 17-21.
Ge Zhaoqiang, Tang Guoqing, Wang Lei. Integrated intelligent service restoration system for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(1): 17-21(in Chinese).
- [6] Miu K N, Chiang H D, Yuan Bentao, et al. Fast service restoration for large-scale distribution systems with priority customers and constraints[J]. IEEE Trans on Power systems, 1998, 13(3): 789-795.
- [7] 李海峰, 张尧, 钱国基. 配电网故障恢复重构算法研究[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(4): 34-37.
Li Haifeng, Zhang Yao, Qian Guoji. Study on the algorithm for service restoration reconfiguration in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(4): 34-37(in Chinese).
- [8] 张锋, 江道灼, 张怡. 基于变结构耗散网络的特殊配电网接线故障恢复的改进算法[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 49-53.
Zhang Feng, Jiang Daozhuo, Zhang Yi. An improved algorithm special distribution network connection service restoration based on variable structure dissipated net theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 49-53(in Chinese).
- [9] 吴文传, 张伯明. 基于待恢复树切割的配电网故障恢复实时算法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 50-54.
Wu Wenchuan, Zhang Boming. A candidate restoring tree cutting based algorithm for real-time distribution system restoration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 50-54(in Chinese).
- [10] Moon Y H, Cho B H, Park H M, et al. Fault restoration algorithm using fast tracing technique based on the tree structured database for the distribution automation system[C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 2000.
- [11] 李卫星, 李志民, 刘迎春. 复杂辐射状配电网系统的可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(3): 69-73.
Li Weixing, Li Zhimin, Liu Yingchun. Evaluation of complex radial distribution system reliability[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(3): 69-73(in Chinese).
- [12] 王金凤, 杨丽徙, 臧睿, 等. 基于改进遗传算法的配电网优化规划[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 64-66.
Wang Jinfeng, Yang Lixi, Zang Rui, et al. Optimal planning for distribution system based on improved GA[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(5): 64-66(in Chinese).
- [13] 靳晓凌, 赵建国. 基于改进二进制粒子群优化算法的负荷均衡化配电网重构[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 40-43.
Jin Xiaoling, Zhao Jianguo. Distribution network reconfiguration for load balancing using binary particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 40-43(in Chinese).
- [14] Baran M E, Wu F F. Optimal capacitor placement on radial distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1989, 4(1): 725-734.



汤亚芳

收稿日期: 2007-11-18。

作者简介:

汤亚芳(1976—), 女, 讲师, 研究方向为配电网优化, E-mail: tangyafang2006@yahoo.com.cn;

陈曦(1982—), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划、最优化理论在电力系统规划中的应用;

程浩忠(1962—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统规划、电能质量等教学和科研工作。

(编辑 李兰欣)

特高压变压器套管成功通过全部型式试验

2008年7月28日, 特高压交流试验示范工程1000kV变压器套管(阿海法P&V公司研制)在国网电力科学研究院通过全部型式试验。试验结果表明, 该产品的电气、机械和热性能良好, 绝缘耐受能力和局部放电及温升等关键指标达到了技术规范和相关标准要求。至此, 1000kV特高压交流试验示范工程关键组部件的型式试验全部完成。国家电网公司特高压建设部、中国电力科学研究院、国网电力科学研究院、保定天威保变、特变电工沈变及衡变、湖北电力试验研究院、阿海法P&V公司的专家代表全程见证了试验。