基于同调分群的解列配置和措施配合研究

李　东[1]，宋云亭[2]，任大江[3]，董晓晶[3]，周宗川[3]，赵　亮[3]，秦晓辉[2]
（1. 华北电力大学(北京)，北京　102206；
2. 中国电力科学研究院，北京　100085；
3. 国网宁夏电力公司经济技术研究院，宁夏　银川　750011）

摘　要： 针对常规解列装置的配合存在误动和拒动的问题，以东北电网2013年500 kV线路相间短路故障为研究对象，根据DBSCAN算法原理，提出了基于同调分群的解列配置及配合方法。结果表明：相对于常规解列方法，基于同调分群配置的解列及配合方法可有效避免电网中布置多套解列装置后，各装置相互间出现的异常动作。

关键词： 同调分群；失步解列；DBSCAN算法；解列配合
中图分类号： TM743　　**文献标志码：** A　　**文章编号：** 1672-3643(2016)04-0009-09
有效访问地址： http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1672-3643.2016.04.002

Research on islanding configuration and coordination based on coherency identification

LI Dong[1], SONG Yunting[2], REN Dajiang[3], DONG Xiaojing[3], ZHOU Zongchuan[3], ZHAO Liang[3], QIN Xiaohui[2]
(1.North China Electric Power University (Beijing), Beijing 102206, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100085, China;
3. Power Economic Research Institute of State Grid Ningxia Power Co., Yinchuan Ningxia 750011, China)

Abstract: Aiming at the problems of maloperation and refusing action in the coordination of the conventional splitting devices, taking the phase- to- phase short- circuit fault of 500 kV power transmission line of Northeast China power grid in 2013 as the research objects, according to according to the DBSCAN method principle, puts forward the method of islanding configuration and coordination based on coherency identification. The result shows that: compared with conventional splitting measures, the islanding configuration and coordination measures based on coherency identification can effectively avoid abnormal action between the devices after multiple splitting devices are installed in power grid

Key words: coherency identification; out- of- step islanding; DBSCAN algorithm; islanding coordination
DOI: 10.3969/j.issn.1672-3643.2016.04.002

基金项目： 国家电网公司大电网重大专项资助项目课题(SGCC-MPLG001-2012)。国家电网公司总部科技项目“基于大数据技术的大电网稳定态势量化评估与自适应防控关键技术研究”。
收稿日期： 2016-05-06
作者简介： 李东(1990)：男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统规划与可靠性。

近年来，随着我国电力系统的发展，电网的结构变得越来越复杂，对电力系统的安全稳定运行提出了更高的要求。解列作为电力系统最后一道防线，在我国得到了广泛的应用。相关文献[1]表明，常规解列配置方案虽然为电力系统的安全稳定运行提供了有力保障，但仍存在一些不足。在电网结构比较坚强，失步断面比较分散的系统内，常规解列装置基本能满足电网安全防御的需要。在多个断面彼此相邻或同一断面存在两组及以上的解列装置的情况下，当系统失步时，若配置不当，存在解列装置无序解列或者误动、拒动的潜在风险。因此，失步解列装置的协调配合研究具有重要的意义。

在失步解列装置的协调配合方面，主要有两种方法：一是借助通信功能，构建解列控制系统，来协调各解列装置之间的配合[2-4]，这为电网有序解列控制提供一个很好的解决方案，但需有很多系统信息的配合并依赖于安全和快速的系统通信；二是利用不同的失步周期数获得装置的选择性[5-6]，即延长装置的动作时间避免装置间的无序动作，某些情况下会降低某些断面解列的快速性。文献[7]则提出在系统无故障下运用慢同调分析掌握发电机群的关联性，系统受扰动后采用聚类分析得到满足发电机同调性和静态功率平衡要求的解列面，然后运用“激活-闭锁”策略以避免连锁解列。该方法为失步解列提供了新的思路，但计算量较大，尤其是根据节点间的拓扑距离进行聚类分析。

在同调分群方面，文献[8-13]将同调分群理论应用到失步解列中，具体应用时可分为两种情况：文献[8-9]基于发电机同调分群结果，依据常规解列判据对可能的解列线路进行判断，以确定相关线路集是否为解列断面；文献[10-13]则基于机组同调分群结果，首先对电网进行分区进而搜索初始解列断面，并以孤岛内发电和负荷平衡为原则优化解列断面。

上述文献在研究失步解列的协调配合研究中，大部分都是基于现有的解列装置配置情况下，去协调各装置的配合问题。但主要存在的问题是如何优化现有的失步解列配置，以防止解列装置的误动、拒动等情况。

针对上述问题，本文首先对东北2013年电网中常规失步解列措施在解列装置较近和末端电压较低的情况下的解列装置配合问题进行了研究和分析，然后研究了基于DBSCAN算法的同调分群方法，在发电机同调分群的约束下对现有的解列措施进行了改进，将改进的解列措施重新配置在电网中进行了校核分析，验证了基于同调分群配置解列措施可有效避免电网中布置多套解列装置后，各装置间可能存在的误动和拒动情况。

1 基于常规解列方案的解列装置配合分析

1.1 基于常规解列方案的配合情况概述

常规解列方案的确定过程是首先找到失步机群和主网非失步机群的范围，然后在这两个机群之间设置相应的解列装置，最后将失稳电网与主网解列的线路集合作为解列方案。目前的失步解列装置配置均是通过这种大量的离线分析计算，根据分析结果将解列装置安装在系统可能的失步断面上。这种失步解列装置的配置方法是以离线计算、事先整定和就地控制为特征。由于现有装置多数基于就地量判据，一旦振荡中心落入本装置的检测范围，且符合动作条件，即解开相关线路，针对不同失步振荡配置的多套解列装置间的配合问题较少涉及也难以考虑，有可能存在装置间的失配问题。

针对该问题，在东北电网相应位置布置针对相关严重故障下的各失步振荡模式的解列措施后，重新校验东北电网可能引发失步振荡的相间短路主保护拒动严重故障，分析所有解列装置全配置条件下，原解列措施的适应性，检验应对其它失步振荡的解列装置可能存在的误动情况。

表1　常规解列方案解列装置间的配合校验

故障线路	原解列方案	常规解列装置全配置下的动作情况	问题统计
(1)沙河营侧	39.5~51.5周波，快解振解青山-北宁、燕南-董家500 kV线路和喀左-建昌、柳城-锦州变、柳城-南票220 kV线路；29.5-53.5周波，快解振解锦州、锦州热及南票电厂升压变	39.5~50周波，快解青山-北辽500 kV线路、柳城-锦州变220 kV线路、燕南-董家500 kV单回线（另一回未动）、喀左-建昌220 kV线路、柳城-南票220 kV线路；29.5~52周波，快解振解锦州、锦州热及南票电厂升压变	燕南-董家其中一回线拒动，解列未完成
(2)董家侧	26~49.5周波，快解振解青山-北宁500kV线路、柳城-锦州变220 kV线路、沙河营-北宁500 kV线路、凌河-曙光220 kV线路、金山-东梁220 kV线路及阜新电厂升压变；136~152周波，快解柳城-南票、建昌-喀左220 kV线路	26~47周波，快解振解青山-北宁500 kV线路、柳城-锦州变220 kV线路、北宁-沙河营500 kV线路、凌河-曙光220 kV线路、金山-东梁220 kV线路；49.5周波，振解阜新电厂升压变；72.5~78周波，快解锦州、锦州热电厂升压变（误动）；154.5~158.5周波，快解建昌-喀左、柳城-南票220 kV线路	多解列锦州、锦州热电厂
(3)北宁侧	54.5~88.5，振解快解辽阳-董家500 kV线路和黄沙-青堆子、双台-新开220 kV线路	34.5~75周波，快解燕南-董家500 kV线路和柳城-锦州变、喀左-建昌、柳城-南票220 kV线路；66~67.5周波，快解锦州电厂升压变；394周波，快解锦州热电厂升压变（所有解列装置均为误动）	原解列装置均未动；已动作的解列装置均为误动，解列未完成
(4)燕南侧	49周波，振解燕山电厂升压变	49周波，燕山电厂升压变振解动作	
(5)渤海侧	49.5周波，振解营口升压变	49.5周波，振解营口1升压变	
(6)辽阳侧	77周波，振解鞍钢4的出线	77周波，振解鞍钢4的出线	
(7)雁水侧	42.5~44.5周波，振解南关岭500 kV主变	42.5~44.5周波，振解南关岭500 kV主变	
(8)南关侧	35.5~53.5周波，振解快解泰山、大连、甘井电厂升压变	35.5~53.5周波，振解快解泰山、大连、甘井电厂升压变	
(9)金家侧	51.5~58周波，振解快解雁水、南关岭500 kV主变	51.5~58周波，快解振解雁水、南关岭500 kV主变	
(10)沙岭侧	118.5~125.5周波，振解宝龙-长岭、城园-双辽、通辽-梨树220 kV线路	118.5~125.5周波，振解宝龙-长岭、城园-双辽、通辽-梨树220 kV线路	
(11)东科侧	93~232周波，振解通辽-梨树、城园-双辽、宝龙-长岭220 kV线路	93~232周波，振解通辽-梨树、城园-双辽、宝龙-长岭220 kV线路	
(12)合心侧	42.5~82.5周波，振解包家-东丰500 kV线路、九台机组升压变	42.5~72周波，振解九台电厂升压变、包家-东丰500 kV线路	
(13)鞍山侧	86.5~91周波，快解哈南-合心以及包家-永源、平安-林海500 kV线路	86.5~94周波，快解哈南-合心、包家-永源、平安-林海500 kV线路	
(14)永源侧	31~34周波，快解平安-林海、合心-哈南500 kV线路	31~34周波，快解平安-林海、合心-哈南500 kV线路；40.5-51周波，快解呼玛-塔河、北安-孙吴220 kV线路（误动）	呼玛-塔河、北安-孙吴解列装置误动
(15)松北侧	49.5~63周波快解振解永源-包家、哈南-合心、林海-平安500 kV线路；38周波~74.5周波快解振解北安-孙吴、北安-海伦、呼玛-塔河220 kV线路，以及哈三机组升压变	38~44周波，快解北安-孙吴220 KV线路、林海-平安500 kV线路、北安-海伦220 kV线路、永源-包家500 kV线路、哈南-吉合心500 kV线路（解列顺序改变）	林海-平安线路解列装置动作提前，呼玛-塔河和哈三A机组解列装置拒动，导致黑龙江电网失去稳定

续表1

故障线路	原解列方案	常规解列装置全配置下的动作情况	问题统计
(16)大庆侧	37~45周波，振解黑多宝山-黑加格达、拉东-克山220 kV线路以及北安电厂升压变	37~45周波，振解黑多宝山-黑加格达、拉东-克山220 kV线路以及北安电厂升压变	
(17)方正侧	26.5~39周波，快解鸡西变-梨树220 kV线路、兴福-群林500 kV线路和滴道-林口、达连-方正220 kV线路	26.5~39周波，快解鸡西变-梨树220 kV线路、兴福-群林500 kV线路、达连-方正220 kV线路、滴道-林口220 kV线路；46周波，振解双鸭9机组升压变(误动)	多解列双鸭机组
(18)群林侧	29~81周波，快解振解庆云-方正500 kV线路和浩良河-西格木、杏花-鸡西变、达连-西格木220 kV线路以及黑鸡西2升压变	29~50周波，快解振解庆云-方正500 kV线路、浩良河-西格木220 kV线路、杏花-鸡西变220 kV线路、达连-西格木220 kV线路；63~68.5周波，快解滴道-林口、鸡西变-梨树220 kV线路(误动)	鸡西地区与两侧电网均断开，成为孤网
(19)庆云侧	41~60.5周波，振解七台河、双鸭、双鸭山电厂升压变	27~43周波，快解鸡西变-梨树、滴道-林口220kV线路(误动)；41~76.5周波，振解七台河、双鸭、双鸭山电厂机组升压变；60-78周波，振解快解庆云-方正500 kV线路、鸡西变-杏花220 kV线路(误动)	鸡西地区与两侧电网均断开，成为孤网；鹤岗A1、佳B厂、鹤立电厂由稳定变为失步
(20)兴福侧	69周波，振解北安电厂升压变	69周波，振解北安电厂升压变	

根据计算结果可知：①有12个故障在失稳情况下，根据常规解列方案配置的解列装置均可正常动作，能够顺利解列失稳电网；②有8个故障在失稳情况下，解列装置出现异常动作(包括拒动和误动)。其中4个故障由于解列装置的异常动作使得电网无法解列或解列效果不好，例如在故障19中，由于两组解列装置的误动，不但未顺利实现解列，还扩大了该故障的失步范围。

1.2 基于常规解列方案的配合存在的问题

根据表1的结果，常规解列方案的配合存在问题的情况主要有2个：解列装置距离较近的情况和末端电压较低的情况。

(1)解列装置距离较近的情况分析。当应对不同故障的解列装置相距较近时，容易引发相关装置的误动，例如燕南地区的断面。

燕南地区断面的解列装置异常动作情况主要有以下3种：①由于柳城-南票、柳城-锦州变线路的解列装置在故障1、2中配置较近且2组解列装置动作时间不同，造成故障1的原解列方案中的一些解列装置不动作，导致其解列失败；②故障1原解列方案多采用快解装置，动作较快，在故障3校核时出现误动，导致故障3的原解列装置均未动作而解列失败，未解列失稳电网；③锦州、锦州热电厂解列装置在故障2中出现误动，导致该故障多切两个电厂。

上述解列装置配置位置临近，因此，当该地区发生相关故障时，其解列装置容易相互影响。

(2)末端电压较低的情况分析。通常电网末端电压支撑较弱，如解列措施为低压解列，相关故障后容易因为电压过低，引发低压解列装置的误动，例如北安地区和鸡西地区的断面。

北安地区的断面存在2组解列装置：一组安装在北安-孙吴、北安-海伦、呼玛-塔河220 kV线路上；另一组安装在多宝山-黑加格达、拉东-克山220 kV线路上。但前者由于均为快解装置，且该地区位于电网末端，发生故障后容易出现电压较低的情况，因此在故障14中出现误动；在故障15中，该解列方案又受黑吉断面解列装置的影响而出现呼玛-塔河解列装置不动作的情况，导致无法解列该断面，使得故障15解列后的电网内部无法保持同步。

鸡西地区的断面也存在2组解列装置：黑鸡西变-梨树、黑滴道-林口220 kV线路组成的解列方案；黑杏花-黑鸡西变220 kV线路组成的解列方案。2组解列装置均为快解装置且该地区也位于电网末端，因此在故障18、19校核中均异常动作，

将鸡西地区与两侧电网断开，使其成为孤网。并且，在故障19中，由于2组解列装置的误动，不但未顺利实现解列，还造成原本与主网同步的鹤岗A1、佳B厂、鹤立电厂在解列装置动作后反而发生失步，扩大了该故障的失步范围。

根据上述分析可知，由解列装置的配合问题引起的误动或拒动等问题，会使得解列无法按照预定的方案实施解列，甚至在严重的情况下会扩大故障的影响范围。

2　基于DBSCAN算法的同调分群方法

2.1　同调发电机的定义

当电力系统受到扰动后，发电机之间存在着同调现象，即各发电机的转子摇摆曲线间的振荡趋势存在相似或一致性。关于同调的定义有多种，最常用的是文献[14]给出的同调发电机的定义：在[0,τ]的任一时刻，若2台发电机转子角偏差满足该式，则两发电机同调，用式(1)表示如下。

$$\left|\triangle\delta_i(t)-\triangle\delta_j(t)\right|\leqslant\varepsilon \tag{1}$$

式中：$\triangle\delta_i(t)=\delta_i(t)-\delta_{i0}$，$\triangle\delta_j(t)$与$\triangle\delta_i(t)$一样，$\delta_i(t)$、$\delta_{i0}$、$\delta_j(t)$、$\delta_{j0}$分别为发电机$i$和$j$在$t$时刻和初始时刻的转子角；$\varepsilon$为阈值；一般在5°~10°；$\tau$取1~3 s。

又根据发电机转子角和转速的关系，可得式(2)。

$$\left|\triangle\delta_i(t)-\triangle\delta_j(t)\right|=\left|\int_0^t\triangle\omega_i\mathrm{d}t-\int_0^t\triangle\omega_j\mathrm{d}t\right| \tag{2}$$

由式(2)可知，可以根据发电机的转速偏差来识别同调发电机，并且在实际电力系统中，发电机的转速偏差也可以直接测量得到，所以使用较为方便。

2.2　DBSCAN算法的基本原理

DBSCAN算法由Ester M artin等人提出[15]，是一种基于密度的聚类算法，在处理数据时具有快速、有效处理噪声点和发现任意形状的聚类等优点。其算法的中心思想是：对于某一聚类中的每个对象，在给定半径(Eps)的邻域内数据对象个数必须大于某个给定值(MinPts)，即邻域密度必须超过某一阈值。

首先介绍DBSCAN算法的几个相关概念：

①空间中任意一点的密度是以该点为圆心、以Eps为半径的圆区域内包含的点数目；

②空间中任意一点的邻域是以该点为圆心、以Eps为半径的圆区域内包含的点集合；

③空间中某一点的密度，如果大于某一给定阈值MinPts，则称该点为核心点；

④空间中某一点的密度，如果小于某一给定阈值MinPts，则称该点为边界点。

DBSCAN算法的聚类过程是一个聚类可以由其中的任何核心对象唯一确定，即可以表述为：

(1)给定任一满足核心对象条件的数据对象p，数据库D中所有从p密度可达到的数据对象o所组成的集合{o|o>Dp}构成了一个完整的聚类C，且p∈C；

(2)给定一个聚类C和它的任一核心对象p，C等价于集合{o|o>Dp}。

为了找到一个类，DBSCAN从D中找到任意对象p，并查找D中关于Eps和MinPts的从p密度可达的所有对象。如果p是核心对象，则根据该算法可以找到一个关于参数Eps和MinPts的类；如果p是一个边界点，则没有对象从p密度可达，p被暂时地标注为噪声点；然后，DBSCAN处理数据库D中的下一个对象。

2.3　基于DBSCAN算法的同调分群方法

对于一个由N台发电机组成的电力系统，发电机的转速偏差w可以被看成随时间变化的数据矩阵。在给定的扰动和相应时间下，各发电机的角速度偏差可以用下面的矩阵表示为

$$w=\begin{bmatrix} w_1(t_1) & w_2(t_2) & \mathrm{LL} & w_1(t_T) \\ w_2(t_1) & w_2(t_2) & \mathrm{LL} & w_2(t_T) \\ \mathrm{M} & \mathrm{M} & & \\ w_N(t_1) & w_N(t_2) & \mathrm{LL} & w_N(t_T) \end{bmatrix}$$

式中：w—发电机转速偏差；

T—仿真时间。

欧式距离能反映2台发电机间受扰动后各自响应的差别，因此，两发电机之间的同调识别可以通过计算这两个发电机的速度偏差的欧式距离来判定。其计算公式见下式。

$$\mathrm{d}_{ij}=\sqrt{\sum_{t=t_1}^{\mathrm{T}}(w_i(t)-w_j(t))^2}$$

式中：d_{ij}—发电机 i 与发电机 j 之间的欧式距离；

$w_i(t)$ 和 $w_j(t)$—分别表示第 i 台发电机和第 j 台发电机在 t 时刻的转速偏差。

对于任意2台发电机，如果 d_{ij} 小于某个值，说明两机受扰后动态行为相近，可视为同调机群；否则被划分到不同机群。将DBSCAN算法应用到发电机同调分群中，需要确定半径Eps、邻域内发电机的个数MinPts，以及时间 T 的大小。半径Eps的大小影响到发电机分群的精度，如果较小，会使得发电机分群较散；如果较大，则可能会将动态特性相符性较差的发电机分到同一个机群中。经仿真分析发现，Eps取1Hz时，能较好地保证发电机分群的精度且动态特性相差较大的发电机也不会被分到同一个机群中，因此，本文取Eps=1Hz。MinPts的大小表示发电机组成机群所需要的最小发电机的数量，经对电网中的电厂分布情况和任一电厂中机组数量统计分析，发现MinPts取5时，发电机可以组成一个机群，因此，本文取5。时间 T 的大小则影响到发电机分群的结果，因为随着时间的变化，发电机的分群结果并不是一成不变的，而且，不同的扰动，得到发电机分群结果的时间也可能不同，因此，本文采用移动时间窗口，每个窗口的时间段 T 取200 ms（即10个周波），如果在连续两个时间窗口里，发电机的分群结果是一致的，那么将该分群结果作为最终的分群结果。

3　基于同调分群的解列配置和配合分析

3.1　基于同调分群的解列措施改进

针对上述问题，现采用基于同调分群的解列方法对解列装置出现误动或拒动的故障重新配置解列装置。其具体的解列配置思路为：首先基于DBSCAN算法对发电机进行同调分群，然后根据发电机分群的结果，在失步机群和同步机群之间或失步机群内的不同调机群之间的适当位置设置解列装置，失步机组中为同一失步机群的机组间不设置解列装置，尽量保证解列后的局部电网或主网所有机组均为一个同调机群。下面以辽宁燕南地区解列装置配合过程中存在的问题为例，说明基于机组同调分群的解列措施重新配置过程，对表1中的故障（1）和（2）进行重新分析。

由于东北电网的发电机数量较大，计算量也相应较大，而在解列时主要关注失步发电机的分群情况，因此，基于DBSCAN算法在MATLAB软件中仅对故障后的失步发电机进行同调分群。由于故障在50周波时结束，每个时间窗 T =10周波，因此，对每个时间窗的分群结果进行对比，直至连续两个时间窗的分群结果一致时，停止分群。故障1和故障2的分群结果相同的时间窗分群情况，见表2。

表2　故障1和故障2的分群结果

时间窗	110~119周波	120~129周波
故障1	机群1：蒙东白、蒙东元、蒙东煤、蒙东西、蒙东赤电厂机组。 噪声点：燕山、南票、锦州、锦州热电厂机组（不成群）。	机群1：蒙东白、蒙东元、蒙东煤、蒙东西、蒙东赤电厂机组。 噪声点：燕山、南票、锦州、锦州热电厂机组。
时间窗	100~109周波	110~119周波
故障2	机群1：蒙东白、东元、东煤、东西、东赤和绥中、燕山、南票、锦州热电厂机组。 噪声点：锦州、阜新、阜新金电厂机组（不成群）。	机群1：蒙东白、东元、东煤、东西、东赤和绥中、燕山、南票、锦州热电厂机组。 噪声点：锦州、阜新、阜新金电厂机组。

3.1.1　故障1解列措施改进

根据表2中的分群结果可知，蒙东元地区机组同调性很好，而其他机组之间则同调性较差；因此，将蒙东元等机组作为一个机群解，；燕山地区各电厂分别解列。具体改进解列方案如下：39~39.5周波，快解青山变电站–辽北宁500 kV线路、锦州电厂升压变电站；46~53周波，振解南票、燕山电厂升压变电站；58.5周波，振解青山变电站–燕南500 kV线路；65周波，振解锦州热升压变电站。

3.1.2　故障2解列措施改进

根据表2中的分群结果可知，蒙东元地区机组与燕山地区大部分机组同调性都较好，仅锦州电厂不在上述机群中；阜新和阜新金电厂机组则同调性较差，无法成为一个机群；因此，将蒙东元地区机组与燕山地区机组作为一个机群解列，去掉柳城–南票等线路组成的解列断面；阜新和阜新金电厂机组分别解列。仿真中发现，若将蒙东元、

燕山地区所有机组作为一个机群解列，内部会出现燕山地区机组与蒙东元地区机组逐渐不同步的现象，如图1。不难看出，最初引起不同步的机组为锦州电厂1号机组，随后为锦州电厂3号机组，其他机组均在450周波以后才出现不同步，这与表2中的分群结果具有一致性。因此，直接解列锦州电厂1号机组后，所有机组不再出现不同步现象。

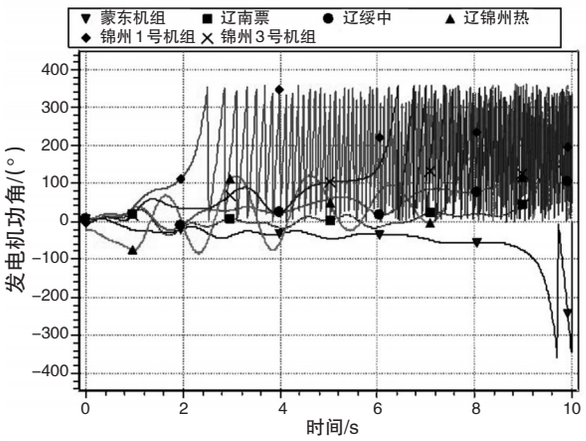

图1　蒙东、燕山地区解列后发电机功角曲线

因此具体的改进解列方案如下：26周波，快解青山变电站-辽北宁500 kV线路；41.5-42.5周波，振解辽北宁-辽沙河营500 kV线路、凌河-曙光220 kV线路；47周波，快解辽金山-辽东梁220 kV线路；49.5周波，振解阜新电厂升压变电站；73周波，快解锦州G1升压变电站。

3.2　基于同调分群的解列措施配合分析

将基于同调分群的改进解列措施全部装设在上述解列措施对应的具体装置后，校验在各故障条件下，各装置间的配合情况。为节省篇幅，现仅列出改进解列措施的故障和基于改进解列措施校核存在问题的故障，其他故障校核时均未出现异常动作，不再列出。

考虑东北全网配置全部的基于同调分群思路的改进解列措施后，在各严重故障下，仅北宁变电站-沙河营故障中，锦州电厂1号机组出现误动，其他故障条件下，解列装置均动作正常，未出现解列装置的误动和拒动。这表明基于同调分群配置解列措施可有效避免电网中布置多套解列装置

表3　基于同调分群的改进解列方案装置间配合校验

故障线路	改进解列方案	改进方案所有解列措施全配置下的动作情况	改进解列方案下的误动拒动
(1)沙河营侧	39~66周波，快解振解青山-北宁500 kV线路和锦州、南票、燕山电厂升压变电站，青山变电站-燕南500 kV线路，锦州热升压变电站	39~66周波，快解振解青山-北宁500 kV线路和锦州、南票、燕山电厂升压变电站，青山变电站-燕南500 kV线路，锦州热升压变电站	多解列锦州1号机组
(2)董家侧	26~73周波，快解振解青山-北宁、北宁-沙河营500 kV线路和凌河-曙光、金山-东梁220 kV线路，以及阜新电厂、锦州1号机组升压变电站	26~73周波，快解振解青山-北宁、北宁-沙河营500 kV线路和凌河-曙光、金山-东梁220 kV线路，以及阜新电厂、锦州1号机组升压变电站	
(3)北宁侧	未改进	54.5~75周波，振解快解辽阳-董家500 kV线路和双台-新开、黄沙-青堆子220 kV线路；67周波，快解锦州1号机组升压变电站(误动)	
(13)鞍山侧	86.5~169.5周波，快解振解哈南-合心、包家-永源、平安-林海500 kV线路和延吉、珲春电厂升压变电站	86.5~169.5周波，快解振解哈南-合心、包家-永源、平安-林海500 kV线路和延吉、珲春电厂升压变电站	
(14)永源侧	33.5~46周波，快解合心-哈南、振解平安-林海500 kV线路	33.5~46周波，快解合心-哈南、振解平安-林海500 kV线路	
(15)松北侧	25.5~102周波，快解振解加格达-塔河220 kV线路和永源-包家、合心-哈南、平安-林海500 kV线路，以及北安、哈三A电厂机组升压变电站，北安-克山220 kV线路	25.5~102周波，快解振解加格达-塔河220 kV线路和永源-包家、合心-哈南、平安-林海500 kV线路，以及北安、哈三A电厂机组升压变电站，北安-克山220 kV线路	
(17)方正侧	33~40周波，快解达连-方正220 kV线路、兴福-群林500 kV线路、鸡西变-杏花220 kV线路	33~40周波，快解达连-方正220 kV线路、兴福-群林500 kV线路、鸡西变电站-杏花220 kV线路	
(18)群林侧	未改进	29~81周波，快解振解庆云-方正500 kV线路和浩良河-西格木、杏花-鸡西变电站、达连-西格木220 kV线路以及鸡西2升压变电站	
(19)庆云侧	34~55周波，快解振解双鸭-集贤500 kV线路、七台河电厂升压变电站	34~55周波，快解振解双鸭-集贤500 kV线路、七台河电厂升压变电站	

后，各装置间可能存在的误动和拒动情况，保证电网按离线计算的预想方案有效解列，提升电网的安全稳定水平。

4　效果评价

从表3的计算结果可以看到，基于同调分群原则设置的解列装置，在解列措施配合中，仅在北宁变电站–沙河营故障中，锦州电厂1号机组出现误动，其他严重故障工况下，所布置的解列装置均能正确动作。表4给出了基于常规解列方案的解列装置的配合和基于同调分群原则设置的解列装置的配合效果。

表4　常规解列方案和改进解列方案的配合对比

故障线路	常规解列装置全配置下的动作情况	常规解列方案下的误动拒动	改进方案所有解列措施全配置下的动作情况	改进解列方案下的误动拒动
(1)沙河营侧	39.5~50周波，快解青山–北辽500 kV线路、柳城–锦州变电站220 kV线路、燕南–董家500 kV单回线(另一回未动)、喀左–建昌220 kV线路、柳城–南票220 kV线路；29.5~52周波，快解振解锦州、锦州热及南票电厂升压变电站	燕南–董家其中一回线拒动，解列未完成	39~66周波，快解振解青山–北宁500 kV线路和锦州、南票、燕山电厂升压变电站，青山变电站–燕南500 kV线路，锦州热升压变电站	
(2)董家侧	26~47周波，快解振解青山–北宁500 kV线路、柳城–锦州变220 kV线路、北宁–沙河营500 kV线路、凌河–曙光220 kV线路、金山–东梁220 kV线路；49.5周波，振解阜新电厂升压变电站；72.5~78周波，快解锦州、锦州热电厂升压变电站(误动)；154.5~158.5周波，快解建昌–喀左、柳城–南票220 kV线路	多解列锦州、锦州热电厂	26~73周波，快解振解青山–北宁、北宁–沙河营500kV线路和凌河–曙光、金山–东梁220 kV线路，以及阜新电厂、锦州1号机组升压变电站	
(3)北宁侧	34.5~75周波，快解燕南–董家500 kV线路和柳城–锦州变、喀左–建昌、柳城–南票220 kV线路；66~67.5周波，快解锦州电厂升压变电站；394周波，快解锦州热电厂升压变电站(所有解列装置均为误动)	原解列装置均未动；已动作的解列装置均为误动，解列未完成	54.5~75周波，振解快解辽阳–董家500 kV线路和双台–新开、黄沙–青堆子220 kV线路；67周波，快解锦州1号机组升压变电站(误动)	多解列锦州1号机组
(13)鞍山侧	86.5~94周波，快解哈南–合心、包家–永源、平安–林海500 kV线路		86.5~169.5周波，快解振解哈南–合心、包家–永源、平安–林海500 kV线路和延吉、珲春电厂升压变电站	
(14)永源侧	31~34周波，快解平安–林海、合心–哈南500 kV线路；40.5~51周波，快解呼玛–塔河、北安–孙吴220 kV线路(误动)	呼玛–塔河、北安–孙吴解列装置误动	33.5~46周波，快解合心–哈南、振解平安–林海500 kV线路	
(15)松北侧	38~44周波，快解北安–孙吴220 kV线路、林海–平安500 kV线路、北安–海伦220 kV线路、永源–包家500 kV线路、哈南–吉合心500 kV线路(解列顺序改变)	林海–平安线路解列装置动作提前，呼玛–塔河和哈三A机组解列装置拒动，导致黑龙江电网失去稳定	25.5~102周波，快解振解加格达–塔河220 kV线路和永源–包家、合心–哈南、平安–林海500 kV线路，以及北安、哈三A电厂机组升压变电站，北安–克山220 kV线路	

续表4

故障线路	常规解列装置全配置下的动作情况	常规解列方案下的误动拒动	改进方案所有解列措施全配置下的动作情况	改进解列方案下的误动拒动
(17)方正侧	26.5~39周波，快解鸡西变-梨树220 kV线路、兴福-群林500 kV线路、达连-方正220 kV线路、滴道-林口220 kV线路；46周波，振解双鸭9机组升压变电站(误动)	多解列双鸭机组	33~40周波，快解达连-方正220 kV线路、兴福-群林500 kV线路、鸡西变电站-杏花220 kV线路	
(18)群林侧	29~50周波，快解振解庆云-方正500 kV线路、浩良河-西格木220 kV线路、杏花-鸡西变电站220 kV线路、达连-西格木220 kV线路；63~68.5周波，快解滴道-林口、鸡西变电站-梨树220 kV线路(误动)	鸡西地区与两侧电网均断开，成为孤网	29~81周波，快解振解庆云-方正500 kV线路和浩良河-西格木、杏花-鸡西变电站、达连-西格木220 kV线路以及鸡西2升压变电站	
(19)庆云侧	27~43周波，快解鸡西变电站-梨树、滴道-林口220kV线路(误动)；41~76.5周波，振解七台河、双鸭、双鸭山电厂机组升压变电站；60~78周波，振解快解庆云-方正500 kV线路、鸡西变电站-杏花220 kV线路(误动)	鸡西地区与两侧电网均断开，成为孤网；鹤岗A1、佳B厂、鹤立电厂由稳定变为失步	34~55周波，快解振解双鸭-集贤500 kV线路、七台河电厂升压变电站	

注：仅列出在常规解列措施配合中存在问题的故障统计。

根据表4的对比，可以看出，基于同调分群配置的解列措施在解列装置的配合中，误动和拒动情况远远少于常规解列措施。这也证明了基于同调分群配置的解列措施在失步解列装置的配合中，潜在的异常动作可能性更小，相比常规解列措施，可以提高电网的安全稳定运行能力。

5　结论

(1)根据对东北2013年电网常规失步解列措施配合分析可知，在解列装置较近和末端电压较低这两种情况下，容易出现解列装置的误动和拒动问题。

(2)以同调发电机的定义和DBSCAN算法的原理为基础，提出的基于DBSCAN算法的同调分群解列方法，可对失步后的发电机进行同调分群。

(3)基于同调分群的解列配置思路可对常规解列措施配合存在问题的解列措施进行改进；改进后的解列措施在电网中的配合分析，证明基于同调分群配置解列措施可有效避免电网中布置多套解列装置后，各装置间可能存在的误动和拒动情况。

参考文献：

[1] 方勇杰. 电力系统自适应解列控制[J].电力系统自动化，2007，31(20)：41-44，48.

[2] 宗洪良，孙光辉，刘志，等. 大型电力系统失步解列装置的协调方案[J].电力系统自动化，2003，27(22)：72-75.

[3] 孙光辉，吴小辰，曾勇刚，等. 电网第三道防线问题分析及失步解列解决方案构想[J].南方电网技术，2008，2(3)：7-11.

[4] 王达，薛禹胜.故障解列与失步解列的协调优化[J].电力系统自动化，2009，33(14)：1-6.

[5] 黄河，曾勇刚，俞秋阳，等.南方电网失步解列装置整定方案[J]. 电力系统自动化，2008，32(5)：90-94.

[6] 刘福锁，杨卫东，方勇杰，等.失步解列装置两级配置方案[J]. 电力系统自动化，2009，33(18)：57-60.

[7] 胥威汀，刘俊勇，李旻，等.避免电网连锁解列的全局协调控制策略[J]. 电力自动化设备，2013，33(3)：33-39.

[8] 李莉，刘玉田.基于同调分群和自适应判据的失步解列策略[J]. 山东大学学报(工学版)，2007，37(6)：49-53.

[9] 潘炜，刘文颖，杨以涵.采用受扰轨迹和独立分量分析技术识别同调机群的方法[J]. 中国电机工程学报，2008，28(25)：86-92.

[10] 汪成根，张保会，郝治国，等.一种电力系统失步解列面的实时搜索方法[J]. 中国电机工程学报，2010，30(7)：86-92.

(下转第23页)