编者按语：

“智能电网”这个名词目前在世界范围内、社会各界中成为热门话题，在电力行业成为电力建设发展的目标。继电保护作为智能电网的重要组成部分，其功能和作用如何发展才能满足智能电网发展的要求，承担起保证电网更坚强、可自愈和能避免大停电等任务，涉及一系列的技术环节。科技工作者凭着电网发展的需要和实现条件的拓展，已经在多方面研究了智能电网继电保护的原理、技术、配置配合与作用。本组论文概略介绍西安交通大学张保会教授课题组近年来在利用暂态量特征实现超高速故障甄别，以减少故障对电网的冲击；改进保护的配置配合方式，增强电网的强壮性；拓展保护的功能，提高电网的自愈性等方面的研究进展。以“抛砖引玉”达到推动智能电网继电保护全面发展的目的，欢迎专家学者就智能电网的继电保护研究、应用等内容不吝赐稿，参与讨论。

智能电网继电保护研究的进展（三）——保护功能的发展

张保会[1]，郝治国[1]，Zhiqian BO[2]
（1. 西安交通大学 电气工程学院，陕西 西安 710049；
2. AREVA T & D UK Limited，Stafford ST17 4LX，England）

摘要： 智能电网要求对被保护的设备能够预警，并保证故障切除后的系统坚强和高安全性。介绍了智能电网条件下继电保护所起作用的发展，提出了将变压器状态检测与主保护跳闸功能一体化的预保护、保护的原理与技术；为防止连锁过载跳闸，给出了将单条线路的过负荷保护发展为输电断面安全性保护的原理与技术；为使有多条线路互联的系统失步解列后的子系统中不平衡功率最小、子系统内不再失步，构建了以解列策略主站协调优化、解列继电器协同动作的失步解列控制系统。

关键词： 智能电网；状态检测；继电保护一体化；输电断面安全性保护；失步解列系统
中图分类号： TM 711　　**文献标识码：** A　　**文章编号：** 1006－6047(2010)03－0001－06

0 引言

教科书对继电保护的作用描述为：自动、迅速、有选择性地将故障元件从电力系统中切除；反映电力设备的不正常运行状态，根据运行管理条件而动作于发出信号或延时跳闸。目前继电保护的绝大部分工作围绕故障识别、快速切除故障元件展开，而是否真正将故障带来的损失减到了最小、故障切除后系统是否安全则考虑的并不多。第二项任务反映电力设备的不正常运行状态，目前多以分散安装的特征量继电器（电压、电流、功率、瓦斯等）反映被保护元件的不正常，发出警报和延时跳闸。在坚强的智能电网中，元件报警后靠人工控制消除不正常往往来不及，一旦延时跳闸，可能会造成连锁跳闸的系统事故；坚强智能电网的电源间往往有多条联络线，不同失步模式下的联络断面变化，靠安装在单条联络线上的失步继电器独立动作很难满足解列后孤立系统中不平衡功率较小的要求。例如美国 2003 年“8·14”大停电事故，保护误动的并不多，更多的是实时控制、保护功能及其配置配合不完善。随着电网单台设备容量增加、网架复杂和电压等级提高，系统对保护的要求提高，保护的功能应当发展才能承担保障电力系统安全的任务。

目前的继电保护性能再优越也不能减少故障的发生。随着单个电力元件容量的增加，减少元件故障率越来越重要，对于一些集中参数的元件如变压器、发电机等，内部故障的发生往往是多种因素积累、绝缘性能逐步下降造成的，近年来电力设备的“状态检测”研究活跃，如果能将检测功能与保护功能合一，则保护不仅可以切除故障还可以减少故障的发生，是实现智能电网自愈、坚强的基础。

本文介绍作者课题组近年来在继电保护功能发展方面的研究进展，如变压器绕组变形检测与保护一体化、输电断面安全性保护和失步解列控制系统，以展示继电保护技术满足坚强智能电网要求的功能发展，更好为系统服务的前景。

1 变压器绕组变形检测与继电保护功能一体化研究[1-5]

目前单台发电机和变压器的容量可达 1 000 MV·A 以上，设备昂贵，单设备故障切除对系统的影响巨大，提高设备的运行可靠性除了提高制造质量

收稿日期：2009－11－11

以外,采用预知维修也是增强电网自愈能力、减少设备故障的有效方法。对于这些带有防护壳体的集中元件,其内部故障大部分因为长期运行后绝缘水平下降、多次外部故障电动力冲击造成机械形变等积累而形成。近年来发展的电力设备状态检测技术,检测设备的健康状态,当设备的内部绝缘下降、亚健康时发出报警信号,建议停运维修,可以减少设备故障的发生,是积极的防御方式。目前已经有部分变压器、发电机状态检测设备现场运行,但是由于需要专门的装置,成本较高、技术尚未成熟,未大量推广。继电保护快速、准确地切除故障元件,只能减少故障带来的危害而不能减少故障的发生,是被动的防御方式。如果继电保护装置能够增加这种主动防御的报警功能,不增加装置的硬件成本和维护工作量,就可以做到既减少故障的发生又快速切除故障,是继电保护为电网"自愈、坚强"做出的贡献。

对于如图1所示的单相双绕组变压器,在非内部短路状态下其回路电压方程满足关系式(1)(2)和式(3):

$$u_1=r_1i_1+L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}+N_1\frac{\phi_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

$$u_2=r_2i_2+L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}+N_2\frac{\phi_\mathrm{m}}{\mathrm{d}t} \tag{2}$$

$$\left(u_1-r_1i_1-L_1\frac{\mathrm{d}i_1}{\mathrm{d}t}\right)-n_\mathrm{T}\left(u_2-r_2i_2-L_2\frac{\mathrm{d}i_2}{\mathrm{d}t}\right)=0 \tag{3}$$

其中,u_1、u_2、i_1、i_2 为原、副边绕组的电压、电流;r_1、r_2、L_1、L_2 为原、副边绕组当前运行状态下的电阻和漏电感;N_1、N_2 为原、副边绕组的匝数;ϕ_m 为原、副边绕组的互感磁通(包括流经铁心的主磁通及与原副边绕组都匝链的等效漏互感磁通)。

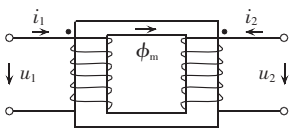

图1 双绕组单相变压器

Fig.1 Two-winding single-phase transformer

利用正常运行或外部故障切除后时间序列的电压、电流采样值可以辨识当前参数 r_1、r_2、L_1 或 L_2,将其与出厂参数或上次辨识的参数 $r_1^{(0)}$、$r_2^{(0)}$、$L_1^{(0)}$、$L_2^{(0)}$ 比较,当其变化大于门槛时表示绕组有一定的变形,可以报警。当发生绕组短路时,参数 r_1、r_2、L_1 或 L_2 相对当前正常运行状态下辨识的参数有较大变化,式(3)将不再成立,考虑一定的门槛,保护跳闸。其连接关系和运算流程如图2所示。

采用西安交通大学动模实验变压器试验数据对本文提出的保护算法进行了验证,在实验中利用试验变压器子绕组联结方式的不同来模拟绕组变形的轴向位移及匝间故障。由表1结果可见,参数辨识误差在1%内,对于严重的绕组变形按照IEC标准中关于电力变压器短路耐受试验前后的短路电抗的变化的规定,而发出告警信号。

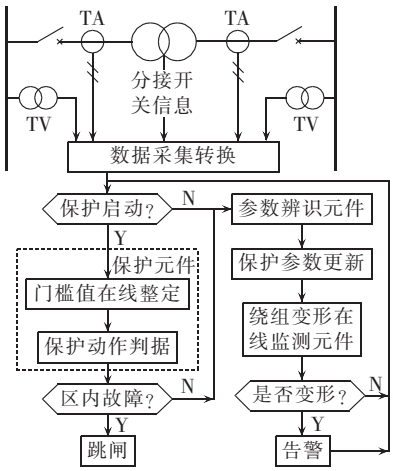

图2 变压器检测、保护一体化流程图

Fig.2 Flowchart of integrated transformer detection and protection

表1 动模变压器模拟绕组变形漏感参数辨识结果

Tab.1 Identified leakage inductance of transformer windings

接线形式	L_{k1}/mH	L_{k2}/mH	e_1/%	e_2/%
1	9.50	9.41	0.95	0
2	9.72	9.66	0.62	2.31
3	9.88	9.94	-0.61	4.00
4	9.37	9.29	0.85	-1.37
5	9.42	9.38	0.42	-0.84
6		8.33		-11.48

注:L_{k1} 为离线测量量;L_{k2} 为在线辨识量;e_1 为辨识误差;e_2 为参数变化。

同时考察了在各种空载合闸、励磁涌流条件下,保护都不会误动。由于通过实时的参数辨识,使得保护计算中的电阻、漏电感参数和动作门槛值适应了变压器当前的实际参数,对于故障的判别更为灵敏。

表2给出在内部不同百分比的匝间短路、内部和外部不同过渡电阻下短路时保护的动作情况。

表2 变压器保护动作情况表

Tab.2 Statistics of transformer protection actions

运行状态				动作量(门槛值1.0)	判别结果
区内故障	匝间故障	原边	2.27 %	1.12~1.40	故障,判断正确
			4.54 %	1.9~11.83	故障,判断正确
			9.08 %	3.18~10.92	故障,判断正确
		副边	4.54 %	2.33~10	故障,判断正确
			9.08 %	3.36~10	故障,判断正确
	单相接地	原边	25 Ω	3.04~5.75	故障,判断正确
			50 Ω	2.65~2.75	故障,判断正确
		副边	25 Ω	3.6~4.3	故障,判断正确
			50 Ω	1.6~2.8	故障,判断正确
	相间故障	原边	25 Ω	2.69~8.36	故障,判断正确
			50 Ω	3.08~8.74	故障,判断正确
		副边	25 Ω	3.91~7.35	故障,判断正确
			50 Ω	3.15~3.88	故障,判断正确
区外故障	单相接地		25 Ω	0.625~0.875	正常,判断正确
			50 Ω	0.75~0.875	正常,判断正确
	相间故障		25 Ω	0.215~0.58	正常,判断正确
			50 Ω	0.628~0.975	正常,判断正确

2　输电断面安全性保护研究[6-8]

为了保证输电元件长期运行的安全，输电线路配备过负荷保护，以报警和延时跳闸的方式工作。然而在现代的互联大电网中，由于输电断面上输电线路连锁过载跳闸造成输电断面断裂，潮流大范围转移，形成大停电事故时有发生。我国部分电网停用输电线路过载保护而将过载控制任务交由调度员实时监控，难于充分发挥输电能力，不是积极高效的防御措施。积极的措施是发展保护的实时控制功能，由监视和保护一个元件的过载到自动控制多条输电线路和整个输电断面的安全，即输电断面安全性保护。当某输电线路出现过载时，如果保护切除该线路不会引起断面内其他线路过载，则允许保护切除该过载线路；当判断出该线路跳闸后会引起断面内新的线路过载，则需要在过载保护延时跳闸时限内，采取紧急控制措施消除该输电断面内任意线路的过载，避免连锁过载跳闸的发生，保证输电断面的安全性和强壮性。

输电断面安全性保护在物理实现条件上，与传统的切除故障元件的继电保护大为不同，后者只关心被保护的设备内部有无故障，使用被保护元件两端局部信息就够了；而前者则需要获取实时的关键和广泛信息，预见全网可能出现的潮流转移问题，快速评估输电断面的输电能力，实时完成消除连锁过载的控制措施。研究解决了以下 3 个关键技术问题。

2.1　输电断面的在线快速搜索

过载支路的跳闸，对各输电线路造成的潮流转移是大不相同的，过载支路的并行输电断面内的线路往往是过载支路跳闸后潮流急剧增加的输电线路。而由于系统运行方式、运行状态的变化，与过载线路相关的并行输电断面的组成也是相应变化的，为减小过载线路保护启动后安全性评估的宝贵时间，在实时潮流状态下基于图论对初始电力网络简化、分区，形成系统状态图；过载发生后，利用含有过载线路的有向图的邻接矩阵与路径矩阵，通过简单的运算，快速搜索出与过载线路相关的并行输电断面。

2.2　输电断面连锁过载的实时预测

在快速判别出过载线路相关的并行输电断面后，采用基于直流潮流的分布系数法预测该输电断面内各条线路潮流的变化。设过载线路 L_i 的并行输电断面中有 m 条线路，过载线路 L_i 断开后，若该断面内任一线路 L_j 发生连锁过载，则有

$$P_j^{(i)}=P_j^{(0)}+\lambda_j^{(i)}P_i^{(0)}\geqslant P_{j,\max}\quad j=1,\cdots,m \tag{4}$$

其中，$P_i^{(0)}$为线路 L_i 断开前 L_i 线路的有功潮流；$P_j^{(0)}$为支路 L_i 断开前线路 L_j 的有功潮流；$P_j^{(i)}$为支路 L_i 断开后线路 L_j 的有功潮流；$\lambda_j^{(i)}$为支路 L_i 断开引起线路 L_j 潮流增加的有功潮流分布系数；$P_{j,\max}$ 为线路 L_j 的最大允许有功热极限。

设支路 L_i 与线路 L_j 端节点分别为 a、b 和 c、d，则 $\lambda_j^{(i)}$ 可表示为

$$\lambda_j^{(i)}=\frac{x_{ab}(X_{ca}-X_{cb}-X_{da}+X_{db})}{x_{cd}(x_{ab}-X_{aa}-X_{bb}+2X_{ab})} \tag{5}$$

其中，x_{ab}、x_{cd} 分别为线路 L_i 与线路 L_j 的电抗；X_{ca}、X_{cb} 等都是线路 L_i 断开前节点电抗矩阵$[X]$中的对应元素，已经存储待用。若过载支路跳闸后不会引起相关断面内其他支路过载，则允许其延时跳闸；否则应采取紧急控制措施，迅速消除过载，输电断面连锁过载的实时评估，是采取紧急控制措施的依据。

2.3　消除输电断面连锁过载的实时控制

当确认并行输电断面存在连锁跳闸的危险后，需要立即采取调整发电机出力或切机、切负荷来快速降低过载支路的有功功率使过载继电器返回，同时不造成断面内其他支路潮流越限。快速的控制策略算法成为关键，下面介绍其步骤。

以节点消除断面过载能力为依据确定控制节点操作序列，其计算可用式(6)综合灵敏度表示，并按照其大小排序：

$$\lambda_i=\boldsymbol{\alpha}_l^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{li}+\sum\boldsymbol{\alpha}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{S}_{ki}\quad k=1,\cdots,m \tag{6}$$

其中，$\boldsymbol{S}_{li}$、$\boldsymbol{S}_{ki}$ 分别是节点 i 对过载支路 l 和断面内其他支路 k 的灵敏度列向量；$\boldsymbol{\alpha}_l^{\mathrm{T}}$、$\boldsymbol{\alpha}_k^{\mathrm{T}}$ 是相应的权重列向量。引入启发式规则采用反向等量配对法选择控制节点，从综合灵敏度最高的 i 节点开始，寻找与之配对的减出力节点 j，可以得到一列控制对对消除断面过载的灵敏度：

$$\lambda_{ij}=\lambda_i-\lambda_j \tag{7}$$

若 $\lambda_{ij}<0$，表明调整 i、j 对会使过载断面潮流下降，固定加出力节点遍历减出力节点，得到一组控制对灵敏度。当 $\lambda_{ij}>0$，表明调整 i、j 对会使过载断面潮流上升，则按加出力点操作序列更换下一加出力点，直到控制对灵敏度对所有过载线路均为负号。

获得控制对消除断面过载的灵敏度组后，为了保证所有正常支路都不过载和控制的可执行性，需要考虑最小的调整量约束后确定调整量：

$$\Delta P_i=\Delta P_j=\min\{\Delta P_{\mathrm{ytl}},\Delta P_i^{\max},\Delta P_j^{\max},\Delta P_{\mathrm{ys\text{-}min}}\} \tag{8}$$

其中，ΔP_{ytl} 为本次控制的应调量；$\Delta P_{\mathrm{ys\text{-}min}}$ 为本次控制的最小约束量；$\Delta P_i^{\max}$ 为节点 i 的可加量；$\Delta P_j^{\max}$ 为节点 j 的可减量。

采用某省电网为研究算例，此系统共有 511 个节点，942 条支路。该系统中 217 号支路过载，过载跳闸延时 5 s。表 3 是在线潮流下搜索到的 217 号支路所在输电断面支路及消除该断面过载的控制前后

表 3　搜索的输电断面及其控制前后潮流变化

Tab.3 Transmission section and power flow information before and after control

断面支路编号	P_1/p.u.	P_2/p.u.	P_3/p.u.	P_4/p.u.	δ/%
217	1.23756	1.1	1.1	1.10397	0.36
827	0.65216	0.78259	0.74808	0.73958	1.15
214	1.69547	2.03456	1.59253	1.59412	0.09
853	2.13716	2.56459	1.94675	1.94487	0.09
211	1.11806	1.34167	1.12216	1.12544	0.29
891	0.15388	0.18465	0.05795	0.06766	14.3

注：P_1 为控制前有功潮流；P_2 为有功潮流极限；P_3 为控制后估算潮流；P_4 为控制后精确潮流；δ 为相对误差。

潮流变化情况,表4是本文计算得到的控制策略表。

表4 控制策略表

Tab.4 Control strategy table

节点编号	节点类型	原来出力/p.u.	上调/下调	控制量/p.u.	最终出力/p.u.
49	发电机	0	上调	0.516179	0.516179
96	发电机	3	下调	0.516179	2.483820
102	发电机	1.35	下调	0.436547	0.913453
305	平衡机	1.5	上调	0.436547	1.936547

在过载前已知输电断面和相应的阻抗阵元素的基础上,接到217号支路过载的启动信号后,得出该控制策略在普通的PC机上需要10 ms的计算时间,控制方案执行后,原过载支路功率小于支路安全极限值,断面内其他支路均不过载,避免了连锁过载的发生。

3 失步解列系统研究[9-12]

失步解列作为系统安全防护的最后一道防线,将失稳的系统分成若干孤岛,使各个孤岛中尽可能保持功率平衡,从而避免大规模的切机、切负荷。目前,失步解列装置多数固定地安装在系统的主要联络线上,利用联络线本地信息,当联络线两侧的系统失步时跳开联络线。在有多条联络线互联、失步模式变化的现代电力系统中,要保证解列后的各个孤岛中尽可能不平衡功率最小、孤岛中的发电机不再失步,依靠单个分散安装的失步解列继电器已经难于完成,需要整合分散动作的失步解列装置,依据实时判别的失稳模式,构成自适应的失步解列控制系统。

失步解列系统由安装在各条联络线上的失步解列继电器和控制主站的解列策略单元组成,之间高速传递信息。扰动发生后,各解列继电器将感受的动作量(如视在阻抗 Z_j、$U\cos\varphi$ 等)每20 ms向解列策略单元传送一次,并在满足本地解列判据时与解列策略控制单元送来的跳闸命令和门出口。单单满足解列继电器的解列判据,则不再跳闸。

控制主站的解列策略控制单元根据扰动前潮流状态和各解列继电器的实时量测量,判别失稳模式、确定不平衡功率最小的解列断面,给相应的解列继电器下达跳闸命令。下面介绍其主要的计算原理和步骤。

a. 根据各失步继电器的实时量测量,将发电机实时分为加速群和减速群。

b. 根据系统的潮流情况和失步机群的组成,按照解列后各孤岛内发电与负荷尽可能平衡的原则,寻找解列断面和跳开的断路器。即应满足孤岛内相对不平衡度较小,如式(9)所示:

$$|D_{Vi}| = \left|\sum_{i\in V_i} P_i \Big/ \sum_{i\in V_i} |P_i|\right| \leqslant \varepsilon,\ \forall V_i \in \{V_1,\cdots,V_k\} \quad (9)$$

其中,$\sum_{i\in V_i} P_i$ 为由孤岛中节点集 V_i 组成的发电机出力与负荷的不平衡功率;$\sum_{i\in V_i} |P_i|$ 为孤岛中发电机出力与负荷大小绝对值之和,反映孤岛的容量大小;ε 为阈值。

c. 主站向解列断面所在的失步继电器下达跳闸命令,失步继电器根据命令和自己的失步判别结果与门后跳开断路器。

而要获得式(9)的满意解,需要求解"完全非多项式问题"。若系统图 $G=(V,E)$,其节点数为 n、边数为 m,对于某一失稳模式,其解列断面搜索空间达 2^m,因而快速搜索的价值是根据电力系统运行状态合理有效地减小搜索空间。需要通过以下步骤实现。

a. 基于潮流追踪的系统分区。在线潮流基础上,形成系统有向加权无损图模型,基于潮流追踪算法得到各发电机节点与负荷节点的有功分配关系,将负荷分配到向其供电最多的发电机中,从而形成与发电机节点数目相等的区域,得到以发电机节点为中心的分区图。

b. 搜寻初始解列断面。搜寻分区图中发电机群间的连接线路,找到一个满足将异步机群隔离的粗糙解列断面。

c. 最终解列断面的确定。合理的解列断面只能位于异步机群之间,在初始解列断面附近。以初始解列断面为基础,根据系统分区过程中保留的支路-节点连接关系,以孤岛内发电和负荷尽可能平衡为目标,在初始断面附近优先移动最能快速减少孤岛不平衡度的负荷到与其相邻的发电有剩余的孤岛中,反复以上步骤,直到所有孤岛的不平衡度已无法减少,得到最终的解列断面。

为验证图分割算法的有效性,对某省电网进行分析计算。该电网220 kV及以上电压等级节点为212个,发电机节点35个,发电机122台,某潮流状态下总发电量为22741 MW,总有功负荷22026 MW,有向加权图如图3所示。

0 s时线路 $e_{25\text{-}180}$ 靠近节点25处发生三相短路,0.12 s后,故障线路被切除,发电机组首先表现为两群摇摆失稳模式如表5所示。按照不平衡度由小到大排序,该失稳模式下对应的前5个解列策略如表6所示。

解列策略1为算法得到的孤岛不平衡度最小的解列策略,需要跳开5条线路,解列策略4需要跳开4条线路但不平衡功率较策略1大近300 MW,因此按策略1实施解列。计算机性能为Intel Core2 2.20 GHz处理器,1G内存,在Windows XP操作系统下进行,在VC++6.0环境下编写的搜索程序,得到解列策略的时间约为20 ms。根据各系统对失步继电器门槛值的整定,执行解列命令完全可以在失步前或失步后进行,实时性可以保证。

表5 发电机分群信息

Tab.5 Grouping information of generators

发电机分群号	发电机节点号	总发电出力/MW
1	3,11,16,18,21,27,28,36,37,40,41,47,60,72,83,86,94,128	11750
2	98,103,112,123,130,135,144,145,151,166,176,184,186,195,201,210,211	10991

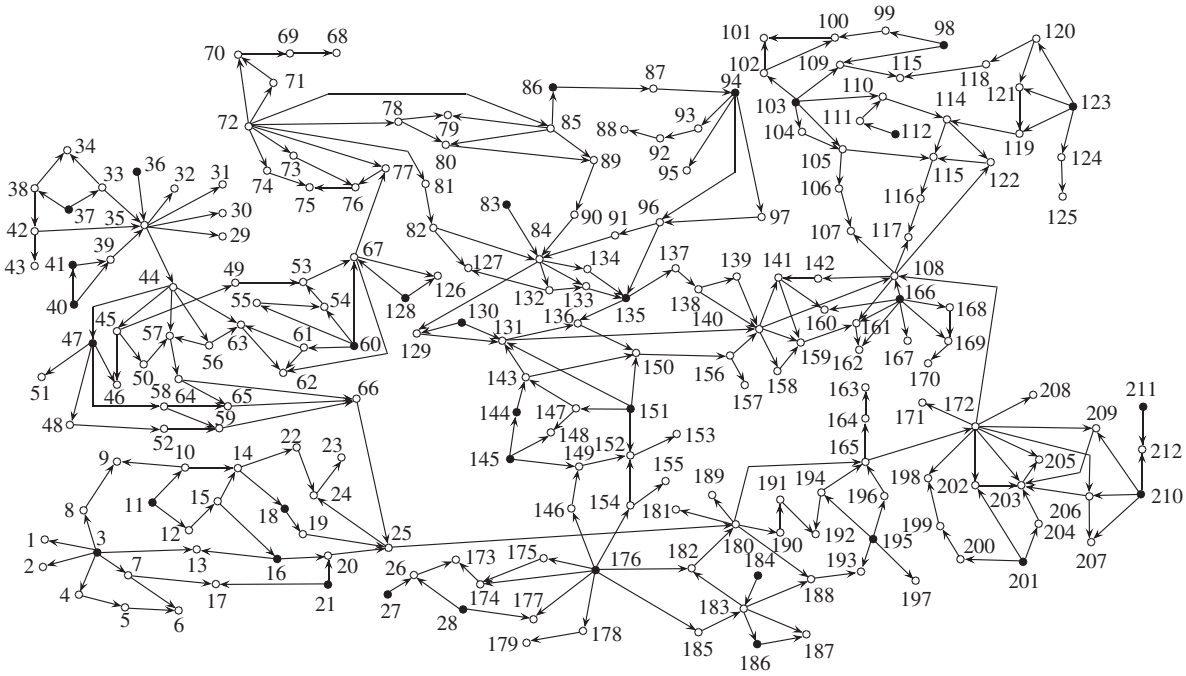

图 3 某省电网有向加权图

Fig.3 Weighted directional chart of a provincial power network

表 6 电网解列策略

Tab.6 Islanding strategy of network

解列策略	断开线路	不平衡功率/MW	不平衡度
1	$e_{96-135}, e_{129-130}, e_{129-131}, e_{133-135}, e_{134-135}$	1686 −1686	0.095 −0.065
2	$e_{96-135}, e_{134-135}, e_{84-133}, e_{132-133}, e_{129-130}, e_{129-131}$	1792 −1792	0.101 −0.069
3	$e_{96-135}, e_{134-135}, e_{84-132}, e_{84-133}, e_{132-127}, e_{129-130}, e_{129-131}$	1955 −1955	0.113 −0.075
4	$e_{96-135}, e_{84-129}, e_{134-135}, e_{133-135}$	1956 −1956	0.114 −0.075
5	$e_{96-135}, e_{84-129}, e_{134-135}, e_{84-133}, e_{132-133}$	2062 −2062	0.120 −0.079

4 结论

要做到智能电网的“自愈、坚强”,继电保护需要承担更多的任务,设备亚健康的预警、输电断面的安全性和系统失步后的解列控制越来越重要,继电保护需要将原有的作用扩大,更多的关注对整个系统安全的贡献。

a. 发展继电保护的“预保护功能”,减少事故的发生,将保护功能提高到具有事故预警、保护为一体,满足智能电网的新要求是可能的。

b. 发展输电线路的过负荷保护成为输电断面的安全性保护,可以自动避免连锁过载跳闸,防止诱发特大停电事故,实时保障电网的强壮性。

c. 发展失步解列控制系统,可以减小解列后子系统中的不平衡功率、减少事故损失。

d. 保护工作者需要解放思想,充分利用现代信息条件,以最大程度满足电网安全运行需求为目标,在新世纪里使继电保护的作用有全面的新发展。

致谢

本文的研究工作曾先后多次受到:国家自然科学基金、教育部博士学科点基金、许继奖教金和南瑞继保公司的研究资助,在此表示衷心感谢!感谢参与本研究的博士、硕士研究生们,他(她)们的智慧、辛劳和创新精神促成了本文。

参考文献:

[1] 郝治国. 电力变压器主保护与绕组变形在线监测一体化原理与算法研究[D]. 西安:西安交通大学电气工程学院,2006.
HAO Zhiguo. Research on principle and algorithm of integrated system incorporating power transformer main protection and on-line monitoring windings deformation[D]. Xi'an:Xi'an Jiaotong University,2006.

[2] 李朋,郝治国,张保会,等. 基于有限元法的变压器漏感计算在绕组变形中的应用[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):49-53.
LI Peng,HAO Zhiguo,ZHANG Baohui,et al. Leakage inductance calculation based on finite element method for power transformer and its application to winding deformation analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(7):49-53.

[3] 高晶,王建华,张保会,等. 变压器漏电感参数在线辨识方法研究[J]. 西安交通大学学报,2008,42(2):199-203.
GAO Jing,WANG Jianhua,ZHANG Baohui,et al. On line identification algorithm for transformer leakage inductance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(2):199-203.

[4] 郝治国,张保会,褚云龙,等. 基于等值回路方程的变压器保护原理[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):67-72.
HAO Zhiguo,ZHANG Baohui,CHU Yunlong,et al. Study on transformer protection principle based on equivalent circuit equilibrium equation[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(10):67-72.

[5] 郝治国,张保会,李朋,等. 漏电感参数辨识技术在线监测变压器绕组变形[J]. 高电压技术,2006,32(11):67-73.
HAO Zhiguo,ZHANG Baohui,LI Peng,et al. Study on on-line detecting of transformer winding deformation based on parameter identification of leakage inductance[J]. High Voltage Engineering,2006,32(11):67-73.

[6] 张保会,姚峰,周德才,等. 输电断面安全性保护及其关键技术研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(21):1-7.
ZHANG Baohui,YAO Feng,ZHOU Decai,et al. Study on security

protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(21):1-7.

[7] 周德才,张保会,姚峰,等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):34-41.
ZHOU Decai,ZHANG Baohui,YAO Feng,et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):34-41.

[8] 姚峰,张保会,周德才,等. 输电断面有功安全性保护及其快速算法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(13):31-36.
YAO Feng,ZHANG Baohui,ZHOU Decai,et al. Active power security protection of transmission section and its fast algorithm [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(13):31-36.

[9] 李颖晖,张保会,于广亮,等. 应用临界失稳模式预测判断电力系统解列面的新方法[J]. 电网技术,2006,30(5):44-48.
LI Yinghui,ZHANG Baohui,YU Guangliang,et al. A new method to determine splitting surfaces of power system by critical unstable mode prediction[J]. Power System Technology,2006,30(5):44-48.

[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]. 西安交通大学学报,2009,43(2):90-95.
WANG Chenggen,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo,et al. A fast method for power system splitting surfaces searching [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2009,43(2):90-95.

[11] WANG Chenggen,ZHANG Baohui,SHU Jin,et al. A fast method for power system splitting boundary searching[C/CD]//IEEE Power and Energy Society General Meeting. Calgary,Canada: IEEE/PES,2009.

[12] WANG Chenggen,ZHANG Baohui,LI Peng,et al. A novel fast searching algorithm for power system self-adaptive islanding[C/CD]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan,China:[s.n.],2009.

[13] 程临燕,张保会,郝治国,等. 基于综合灵敏度分析的快速控制算法研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(4):46-49.
CHENG Linyan,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo,et al. Fast control algorithm based on integrative sensitivity analysis[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(4):46-49.

[14] CHENG L Y,ZHANG B H,BO Z Q,et al. Feasibility study on active power security protection of transmission section[C/CD]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan,China:[s.n.],2009.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统继电保护、安全稳定控制和电力线通信等领域的教学、科研工作(**E-mail**:bhzhang@mail.xjtu.edu.cn)。

Development of relay protection for smart grid(3): development of protection function

ZHANG Baohui[1],HAO Zhiguo[1],Zhiqian BO[2]

(1. Xi'an Jiaotong University,Xi'an 710049,China;
2. AREVA T & D UK Limited,Stafford ST17 4LX,England)

Abstract: The early warning to protected device and the post-fault system robustness and high secure are required by smart grid. The development of protection functions for smart grid is introduced. The principle and technique of integrated state detection and main protection is presented for transformer. The principle and technique of transmission section security protection based on line overload protection is also presented to avoid the cascaded overload trips. In order to make the unbalanced energy of subsystem smaller after system disconnection to maintain the in-step condition within the subsystem,an islanding control system is constructed,the master station of which is responsible for the coordination and optimization while the islanding relays are responsible for the coordinated actions.

Key words: smart grid; state detection; relay protection integration; transmission section protection; islanded system