

[区域电网]

基于VSAT的区域电网静态电压稳定性评估

文/国网四川省电力公司检修公司 王 芳 程 飞 秦 川 雷汉樟 方 源

故障筛选和排序的目的就是在所有可能的故障中找出导致系统电压不稳定的关键故障，在VSAT的基础上，介绍了一种基于电压稳定裕度的故障筛选方法，并运用山东电网数据，找出故障列表中导致胶东地区电压不稳定的关键故障。并对山东电网进行模态分析和无功备用分析，找出了电压稳定薄弱点和薄弱区域。在模态分析中，通过分析参与因子的大小来找出薄弱点，在无功备用分析中，通过RPRI指标来分析找出关键节点。运用VSAT对山东电网不同运行方式下进行仿真分析，评估了山东电网静态电压稳定性。

随着电力系统规模和复杂程度不断增大，电压稳定性问题已经成为系统规划及安全稳定运行关注的焦点。引起电压不稳定的因素很多，但其最根本的原因就是系统固有的脆弱性。目前的很多文献对电压不稳定现象、机理都做了深入的阐述，许多研究方法也被引入到电压稳定性评估中来。电压稳定分析主要包括静态分析和动态分析，静态分析方法是捕捉不同时间框架下沿着时域轨线系统状态的快照，主要回答的是电压不稳定裕度和电压稳定性机理两方面的问题，运用的基本理论是潮流多解和可行解域理论，主要有潮流方法、奇异值分解法、灵敏度分析、模态分析等方法。动态分析法主要是研究在时域仿真的基础上观察电压不稳定的变化过程，分析其不稳定机理及控制措施效果。主要方法有时域仿真法和能量函数法。

运用加拿大Powertech Labs Inc.开发的电力系统电压安全评估商业软件VSAT (Voltage Security Assessment Tool) 对山东电网进行静态电压稳定性评估，通过对故障集的筛选，找到影响系统电压稳定的关键故障，并运用模态分析法和无功备用分析法分析了山东电网的静态电压稳定性。

山东电网概况

如图1所示，山东电网目前已基本形成覆盖济南、德州、滨州、淄博、潍坊、烟台、青岛、日照、临沂、枣庄、济宁、泰安、菏泽及聊城14市的500 kV环网网架，并通过500 kV聊城变电站至河北邯郸辛安开关站的双回线与华北电网实现了互联，逐步形成了“五横三纵”的500 kV主网架结构。本文以山东电网某年运行方式数据为计算基础，该方式下山东电网统调装机容量4435.4万kW，其中地方电厂容量1048.7万kW。500 kV变电站19座，变压器36台，容量2600万kV·A，500 kV输电线路45条，长度共计3 852 km。220 kV变电站224座，容量6176万kV·A，线路14 622 km。最高统调用电负荷为3334.9万kW，最低负荷为1425.8万kW，电网最大峰谷差为1186.7万kW。

山东电网的电源特点为火电为主，风电、核电及其他可再生能源为辅，而随着电力需求的快速增长以及区域间网络联系的不断增强，其逐渐由独立的地区电网转变为复杂的混联受端电网。同时，由于山东电网内电源支撑点主要集中在其西南地区，经济较发达、负荷水平较高的东部及北部地区电源点较少，负荷落点及电源支撑点分

布不平衡,导致山东电网形成了潮流流向由西到东的格局。

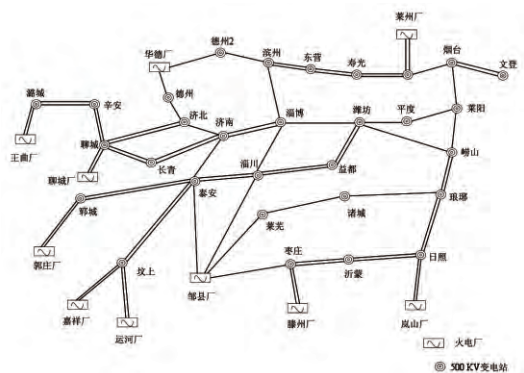


图1 山东电网500 kV主网架图

VSAT故障筛选

1. 理论介绍

在大型电力系统中,导致电压失稳的因素很多,主要有系统波动、无功支撑不足、系统故障等,而导致电压失稳的关键故障则很少。因此,如何筛选出这些关键故障是进行电压稳定分析的首要工作。

筛选关键故障的前提是:①系统各负荷落点及电源支撑点的电压波动范围固定。②根据系统负荷的重要程度,确定系统各节点的电压稳定裕度。③系统的网架结构确定。④系统任一回输电线路的传输极限固定。VSAT根据以上前提,通过对不同故障下故障前运行状态及故障后运行状态进行对各节点的电压稳定裕度进行计算,最终筛选出导致电压失稳的关键故障。

图2给出了一系列与基态相对应的节点故障态PV曲线,所谓基态即为系统的初始运行状态,故障后节点PV曲线与基态曲线愈近,说明故障程度愈轻,相反,故障后PV曲线越远离基态曲线,则说明故障程度越重,更容易造成系统的不稳定。基于这种讨论,将PV曲线区域分为四个部分来说明故障的严重程度,分别为:一级、二级、三级、四级。其中一级则表示故障程度较轻,对系统影响较小,四级则表示对系统影响很大,更容易造成系统不稳定。用迭代滤过的方式来分析故障所述类型。

在图2中,为了识别一级故障,在基态潮流C点对所有故障进行分析,只有PV曲线与过C点的垂直线相交的故障才会有解,这样所选的故障即为一级故障。为了识别二级故障,则是在B点进行故障态PV曲线分析,当鼻尖落在二级区域时,则表明此故障属于二级故障。同理可以识别三级故障和四级故障。由以上分析可知,故障筛选的要点就是故障区域的划分。

表明此故障属于二级故障。同理可以识别三级故障和四级故障。由以上分析可知,故障筛选的要点就是故障区域的划分。

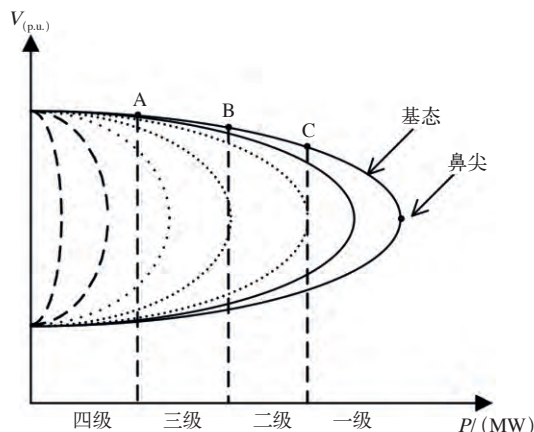


图2 迭代滤过示意图

在图2中,为了识别一级故障,在基态潮流C点对所有故障进行分析,只有PV曲线与过C点的垂直线相交的故障才会有解,这样所选的故障即为一级故障。为了识别二级故障,则是在B点进行故障态PV曲线分析,当鼻尖落在二级区域时,则表明此故障属于二级故障。同理可以识别三级故障和四级故障。由以上分析可知,故障筛选的要点就是故障区域的划分。

2. VSAT故障筛选具体步骤

VSAT中的故障筛选是基于最大功率传输水平。通过以下步骤可以在故障列表中找到个严重故障:

1) 从系统的起始运行点(由PSAT算得)开始,计算观测节点的故障前PV曲线,在功率传输方向上找到“鼻尖”,既系统的最大功率传输点,系统的PV曲线如图3所示。

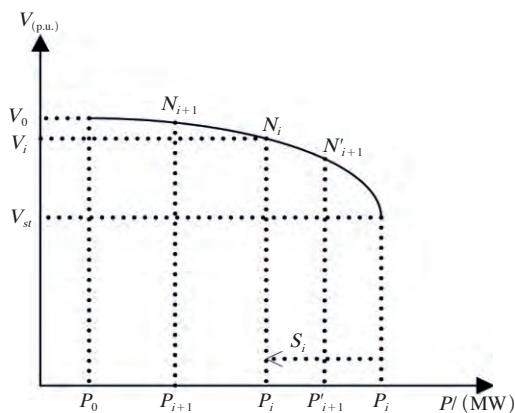


图3 故障筛选示意图

2) 在鼻点处减少传输功率 S_i , 得到运行点 P_i , 如上图所示。在运行 P_i 处处理所有故障, 找到 N_i 个故障导致扰动后潮流不收敛;

3) 如果 $N_i = N_c$, 系统筛选结束, 输出 N_i 个故障;

4) 设置计数器 $i = 1$;

5) 如果 $N_i > N_c$, 减少传输功率到 $P_{i+1} = (P_0 + P_i) / 2$, 在 N_i 个不稳定故障中找到 P_{i+1} 个故障。如果 $N_i < N_c$, 那么增加传输功率到 $P'_{i+1} = (P_i + P_m) / 2$, 在所有故障中找到 P'_{i+1} 个故障能够导致系统不稳定。

6) 如果 $N_{i+1} = N_c$ 或者 $N'_{i+1} = N_c$, 筛选结束, 输出故障。

7) 如果 $N_{i+1} > N_c$, 则将 P_m 替代 P_i ; 如果 $N_{i+1} < N_c$, 则将 P_0 替代 P_i , 计数器 $i + 1$, 重复步骤5)。

当 $P_{i+1} - P_i < \varepsilon$ (ε 为收敛判据) 或者当搜寻的点超过极限时, 程序停止。例如, 在电压稳定裕度几乎相同的100个故障中找出10个比较严重的故障, 那么系统的搜寻步长将会非常的小, 这样将会很费机时, 找出来的故障则毫无意义。

3. 山东电网故障筛选

采用某年典型运行方式数据, 网架结构基础为该年山东电网500 kV和220 kV主网。由数据可知, 青岛、烟台、威海电网地处山东电网受端, 存在着导致电压不稳定的隐患。在本文中, 系统各节点负荷大小根据本地区该年负荷预测确定, 其功率因数保持不变, 各负荷落点同步增长, 比例不变。电源出力分配方式则按照严重情况考虑, 即在东部地区及北部地区发电机全发方式下, 烟台、威海及青岛地区增加的负荷由西部及南部处于旋转备用的发电机按比例进行分担, 一旦某机组出力达到限值, 则其他机组承担其超出容量。根据对系统潮流走向分析, 西电东送、南电北送主要通过系统“三纵三横”网架结构传输, 因此可以考虑以下两种运行方式。方式一: 北通道及中通道的潮流的变化主要受西部地区发电出力的影响; 方式二: 南通道和中通道潮流的变化则主要受南部及西南部电源出力的影响。

规定青岛、烟台、威海地区各节点的故障前最高电压为1.2p.u, 最低电压为0.9p.u。所列出的17种故障包括系统线路故障和节点故障。通过VSAT故障筛选, 得到两种方式下的筛选结

果如表1所示。

表1 故障筛选结果

序号	方式一		方式二	
	线路名	电压等级 /kV	线路名	电压等级 /kV
1	枣沂线	500	淄益线	500
2	淄益线	500		

由表1可以看出, 当系统在方式1运行时, 如若枣沂线或者淄益线发生故障时, 都会造成青岛和烟台威海地区的电压不稳定, 主要原因是枣沂线是鲁南地区通往胶东地区的主要通道, 淄益线是中通道上的主要干线。如若其中任何一个因故障退出, 势必会造成相对通道输电压力增大, 造成胶东受端地区供给不足, 引起电压不稳定现象。当系统在方式二运行时, 北通道和南通道则承担胶东地区的主要输电任务, 因此当淄益线故障时, 也会造成胶东地区的电压不稳定现象发生。由此可以看出, 中通道对胶东地区电压稳定支持的重要性。

模态分析

1. 理论介绍

线性化的静态系统功率-电压方程可以表示为

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, ΔP 、 ΔQ 为节点的有功、无功增量; $\Delta \theta$, ΔV 为节点的相角和电压幅值增量; 雅克比矩阵中的各元素则给出了功率与电压之间的灵敏度。

令 $\Delta P = 0$, 则

$$\Delta Q = J_R \Delta V \quad (2)$$

$$J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV} \quad (3)$$

J_R 为系统简化的雅克比矩阵, 反映了节点电压与节点注入无功功率之间的关系。令 $J_R = M \lambda N^T$, 其中 λ 为 J_R 的特征值矩阵, M 、 N 则为 J_R 的左、右特征矢量形成的模态矩阵。

模态分析技术则是利用系统的静态模型, 通过分析雅克比矩阵规定数目的最小特征值及其特征矢量 M 、 N 来分析电压稳定性的。每一个特征值与电压/无功功率变化模式相关, 其大小则表征了相应模态电压的脆弱程度, 提供了接近电压不稳定的相对量度。特征矢量则用来描述模态, 它提供关于网路元件和发电机在每一个模式中的参与程度和电压失稳机理的信息, 其中与最小特征值相关的右特征矢量的最大元素与系统内电压最灵敏的关键节点相对应。

定义节点*K*对模式*i*的参与因子为

$$P_{Ki} = N_{Ki} M_{iK} \tag{4}$$

*i*模式下, 节点的参与因子越大, 则表明此节点处电压-无功的灵敏度越大, 越容易从此节点开始电压失稳。模态分析一般有两种失稳模式, 一种为局部失稳模式, 只有很少量节点有大的参与因子, 另一种为全局失稳模式, 许多节点具有小且类似的参与因子。

2. 山东电网实例分析

基于以上所述, 系统以方式一运行时, 当枣沂线发生故障时, 胶东地区发生电压不稳定现象, 此时, 鲁西南及鲁南电厂发出的极限功率为6 620 MW, 胶东地区的极限负荷为6392.8 MW。淄益线对方式二运行起着非常重要的作用, 对方式一和方式二故障情况下的进行模态分析, 结果选取系统输出前60个节点, 如表2所示。

表2 模态分析结果

序号	方式1			方式2		
	特征值: 0.278165			特征值: 0.379308		
	节点	区域	参与因子	节点	区域	参与因子
1	120	20	1.00000	131	20	1.00000
2	122	20	0.99335	130	20	0.99411
3	119	20	0.99205	120	20	0.98071
4	121	20	0.98972	117	20	0.97577
5	118	20	0.97558	122	20	0.97560
6	131	20	0.95860	119	20	0.97386
...	...	...	...	...	...	...
49	147	20	0.74292	127	20	0.74605
50	22	5	0.73789	138	20	0.63578
51	138	20	0.69684	101	20	0.54331
52	23	7	0.68847	99	20	0.49199
53	25	7	0.68226	95	17	0.39361
54	24	7	0.67399	152	21	0.38408
55	99	20	0.63601	100	20	0.36168
56	101	20	0.55302	97	17	0.34445
57	26	7	0.55035	23	7	0.33945
58	95	17	0.51204	25	7	0.33852
59	152	21	0.34271	24	7	0.33304
60	100	20	0.27037	96	17	0.32197

由表2输出的60个节点模态分析数据可以看出, 系统方式一运行时, 枣沂线发生故障对前湾220 kV变电站影响最大, 最容易发生电压不稳定。方式二运行时, 淄益线发生故障, 南京路220kV变电站首先出现电压不稳定。由区域列表可以看出, 在方式一情况下, 所输出的60个节点中, 有53个节点属于青岛(区域20), 4个节点属于日照(区域7)。在方式二运行时, 系统识别出的薄弱区域有青岛、日照、潍坊(区域17)。由参与因子大小可以看出, 系统电压失稳主要是一种全局性失稳模式, 由此可以看出青岛地区最容

易发生电压不稳定现象。烟威地区之所以电压稳定性高, 主要是因为莱州电厂为它们提供功率支持。青岛市内无后备电厂, 负荷主要是靠外部功率支持, 因此容易发生电压不稳定现象。

无功备用分析

系统的电压稳定性水平高低主要受发电机组的无功输出极限影响, 在重负荷情况下, 无功备用容量不足可能导致系统的电压稳定性遭到破坏。同时, 随着节点负荷功率的变化, 对与其耦合度较高的发电机组的无功输出影响较大, 这些发电机组对维持该节点的电压稳定性水平起着关键性作用, 因此可定义系统的无功备用指标RPRI (Reactive Power Reserve Indicator) 为

$$RPRI = \frac{\sum_{i \in G_R} (Q_i^{\max} - Q_i)}{\sum_{i \in G_R} Q_i^{\max}} \tag{5}$$

式中, G_R 表示与稳定性水平较差节点耦合程度较高的关键机组节点集合, Q_i 和 $Q_i^{\max}$ 分别为第*i*台发电机组的无功输出和最大无功输出值。

指标RPRI反映了关键机组集合 G_R 总的无功储备情况, 直接影响到与其耦合关系较强的薄弱节点的电压稳定水平。但是, 随着关键机组无功出力达到其极限, 该台机组也失去了对该薄弱节点的电压稳定支撑能力, 因此, 集合 G_R 的个体是随着系统无功出力的变化而变化; 同时, 由于系统中每个负荷节点都对应某一 G_R , 当某一发电机组由于达到无功输出极限而退出 G_R 时, 系统的无功潮流的传输路径也必定改变, 造成影响该节点的关键机组集合重新改变。集合 G_R 的改变将会引起指标RPRI的非连续性变化。

表3给出了在不同运行方式下的区域RPRI指标数据, 由表中可知, 随着胶东负荷的增加, 为了给胶东负荷提供无功支持, 鲁西南及鲁西北发电厂无功备用逐渐减少, 当淄益线发生故障时, 系统无法提供足够的无功支持, 以至胶东地区出现电压不稳定现象。

表3 关键区域发电机无功备用指标

方式	负荷/MW	RPRI		
		故障前	淄益线	枣沂线
1	6192.8	0.5036	0.3900	0.3435
	6392.8	0.4767	0.2444	0.2452
	6492.8	0.4435	0	0
	6192.8	0.5573	0.3924	
2	6392.8	0.5319	0.2866	
	6492.8	0.5161	0	

(下转第74页)

2) 系统的监测

从振动监测系统可以看出，齿轮箱高速轴承（发电机侧）、齿轮箱高速轴承（风轮侧）、齿

轮箱中间轴、齿轮箱行星轴、发电机轴承（DE侧）、发电机轴承（NDE侧）、主轴承（风轮侧）、主轴承（发电机侧）、XY轴均能监测。



图7 振动监测

该系统能实现7×24 h全天候监控。可提前预警机组的异常振动，实现预先维护，降低机组的维护成本。

结束语

一个风场良好的运行业绩离不开人、机、法、料、环等方面的管理。通过分析风场运行

过程中涉及到的人员管理、备件管理、工具管理及信息化探索，可以实现风场运行管理的关键KPI细化，实现风场效益的最大化。随着风电行业的快速发展，不同种类的先进技术运用在风场管理上，将大大促进风电的发展。EA

(收稿日期：2015.06.18)

(编辑：白文亭)

(上接第69页)

胶东负荷的增加，导致了关键发电机达到了其无功限制，方式一运行时，当负荷为6192.8 MW，枣沂线发生故障时，系统达到无功限制的关键节点为黄岛直流3、4号落点和青岛直流落点。当负荷增加200 MW后，岚山电厂也达到其无功限制。当淄益线发生故障时，黄岛直流落点及青岛直流落点分别达到其无功限制，随着负荷的增加，岚山电厂、莱州电厂也分别达到其无功限制。

结束语

本文介绍了VSAT故障筛选方法，并在山东电网典型运行方式数据的基础上设置了17种故障，

并运用VSAT筛选出了影响烟台威海及青岛区域电压稳定性的故障，在不同的系统运行方式下，通过模态分析法分析了山东电网的电压稳定性，结果表明，当枣沂线、淄益线发生故障时，胶东、日照、潍坊等地区会发生电压不稳定现象，是山东电网的薄弱区域，需要进行无功支持。

随着山东电网网架结构的不断增强及宁东-青岛的±660 kV直流输电工程、海阳核电站和胶东抽水蓄能电站的完工，胶东地区的电压稳定性会有很大的提高，为保证山东电网的安全稳定运行提供保证。EA

(收稿日期：2015.06.18)

(编辑：白文亭)