

基于PV曲线与改进模态法分析电网电压薄弱区域的研究

随着电网的发展,电力网络日趋复杂,负荷和机组容量的增大以及环境和经济因素的制约使电力系统更加接近稳定极限。提出了一种基于PV曲线与改进模态法结合应用来识别电压薄弱区域的新方法。首先推导了PV曲线和改进模态法的算法,结合某地区电网某特定运行方式进行实例分析,由PV曲线找出极限运行点,分别由V-Q模态法以及考虑有功功率变化影响的改进全模态法计算当前运行点和极限点各节点的参与因子,找出薄弱区域、关键支路和发电机,所得结果与该电网实际运行情况相符。该方法具有系统性,且快速简便,对预防及控制电压失稳、保证地区电网安全稳定运行有一定指导意义。

王惠平 朱晟毅 李登峰 和敬涵 徐云霞/北京交通大学电气工程学院

0 引言

目前,电力系统的规模不断扩大,网络结构日趋复杂,不断向大机组、大电网、高电压和远距离输电的方向发展。随着负荷和机组容量的增大、用户对电能质量要求的提高等,对电网的安全运行提出了更高要求。考虑到环境和经济因素的制约,使得电力系统运行趋于稳定极限状态,以满足电力的需求。近年来,国内外电力系统多次发生电压崩溃事故^[1-3],导致大面积停电,对社会造成巨大损失,引起了世界各国对电压稳定的广泛研究。电压崩溃往往是从电网最薄弱节点或最薄弱区域开始,继而蔓延到其他节点或区域,最终引起全系统崩溃。在用电负荷快速增长的背景下,电力系统电压稳定性分析急需解决如下问题^[5]。判断系统在某一运行方式下电压是否稳定;求出系统在当前运行方式下的稳定裕度;找出系统中电压稳定

的薄弱节点、支路确定的薄弱区域,并提出相应的电压稳定预防控制措施,对于避免电压崩溃事故的发生具有非常重要的意义。

电压稳定性是指电力系统在正常运行或经受扰动后维持所有节点电压为可接受值的能力。目前电压稳定性分析的方法主要有最大功率法、灵敏度法^[6]、潮流多解法、分歧分析法、奇异值和特征值分解法^[7]等,这些静态分析方法因简单直观、所需的系统运行数据少、计算速度快以及提供信息较多而得到了广泛研究。

但是目前研究确定电网电压薄弱区域的方法主要有全网N-1电压扫描计算静态稳定裕度(有功裕度指标、无功电压灵敏度指标)以及单一V-Q模态法计算各节点的最小特征值参与因子找出哪些节点或区域的电压稳定性较差。前者方法虽然直观、简单易被人接受,但其计算量大、提供信息少且只适合恒功率负荷模型;后者只考虑无功参与因子,节点仅包含负荷节点,没有考虑发电机节点的参与作用以及支路参与因子影响,且传统模态法只计算当前运行点的节点参与因子。文献[13]应用模态法分析时,使用的是无功电压模态法^[14],在系统稳定运行裕度较大时,有功功率对雅可比矩阵特征值的影响很小,可以忽略不计;而当系统运行在临界失稳或稳定裕度很小时,有功功率对系统的雅可比矩阵特征值产生较大影响,不可忽略,此时应使用全电压模态分析法^[14]。



王惠平/硕士研究生

关键词/Keywords

电压稳定 ·
PV曲线 ·
改进模态法 ·
参与因子 ·
薄弱区域 ·

结合以上分析,将PV曲线与改进模态法联合应用来分析电网电压薄弱区域的问题。首先模拟电网的 $N-1$ 运行方式,用以查看电网中元件因故障退出运行后,系统各节点对负荷正常持续供电的能力。然后运用连续潮流法得出关键节点的PV曲线,找出稳定运行极限点并计算功率储备系数,衡量静态电压稳定裕度。以此结果为基础,最后分别采用 $V-Q$ 模态分析法和全模态分析法计算当前运行点及稳定极限点的各节点、发电机和支路的参与因子。从整个电网出发,得出与电压稳定性相关的详细信息,确定出电压薄弱区域,为无功补偿和校正提供依据。

1 关键节点的PV曲线和电压稳定裕度

通过对主网中500 kV线路及变压器元件进行 $N-1$ 事故模拟,分析统计造成较多节点电压越界的线路或变压器元件,并将其定义为全网的薄弱支路。全网 $N-1$ 事故模拟后,找出电压低于0.9的负荷节点。以 $N-1$ 事故模拟得出的低电压负荷节点作为关键节点,这些关键节点的PV曲线可以作为判断系统电压静态稳定裕度的有效工具。通过建立节点电压和一个区域负荷或传输界面潮流之间的关系曲线,从而指示区域负荷水平极限或最大传输界面功率。如图1所示,在PV曲线中,横坐标表示某电网区域或者传输界面的总负荷 P ,纵坐标表示关键负荷节点的电压幅值。PV曲线的拐点为稳定运行的极限点。极限点对应的负荷 $P_{\max}$ 为极限负荷或最大功率传输极限,极限点对应的电压为稳定运行的极限电压 V_{cr} 。电网中的实际运行点的负荷或传输功率与极限负荷或最大传输功率之差可以综合反映系统的静态电压稳定裕度。

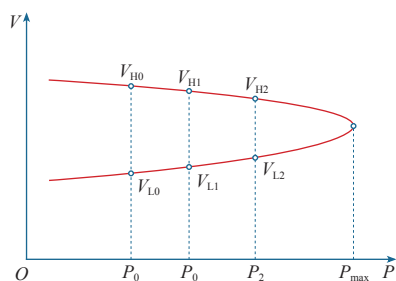


图1 典型PV曲线

在实际电网中,常以有功裕度指标 K_p 来反映系统的静态电压稳定裕度。有功裕度指标 K_p 定义为

$$K_p = \frac{P_{\max} - P}{P} \quad (1)$$

式中, $P_{\max}$ 为极限有功功率; P 为正常运行有功功率。

有功裕度指标中的PV曲线反映电网节点电压随电网中负荷增长发生变化的过程。采用连续潮流算法,从当前运行点开始,保持负荷功率因数不变,缓慢增长所有带负荷节点的负荷到临界状态,便得到各节点的PV曲线,从而计算出有功裕度 K_p 。

虽然有功裕度 K_p 的大小与系统的静态电压稳定性有较好的一致性,然而当节点的PV曲线较平坦时,其不能很好地反映系统的静态电压稳定性,因此通过PV曲线找出系统的电压稳定极限点,为全电压模态法提供有效信息。

2 静态电压稳定的模态法原理

模态分析最初是用于小干扰功角稳定分析的。Gao等最先将模态分析应用到电压稳定研究中^[4]。利用模态分析,可以预报电压崩溃,辨识电压稳定的薄弱点和易发生电压失稳的区域,为无功补偿地点和方式提供参考依据,传统 $V-Q$ 模态法使用的简化的雅克比矩阵,只考虑了无功对电压的影响,但是当系统运行在临界失稳,有功功率对系统的雅可比矩阵特征值产生较大影响,不可忽略,需要采用考虑有功功率变化影响的改进全模态法分析,计算出最小特征值下各节点、发电机和支路的参与系数,找出电压薄弱区域。

2.1 潮流方程雅克比矩阵的特征结构分析

系统静态潮流方程功率-电压方程可表示为

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QV} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{pmatrix} = J_s \begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中, J_s 为常规潮流雅克比矩阵; $\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix}$ 为功率不平衡向量; $\begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{pmatrix}$ 为电压不平衡向量。

传统的分析认为电压幅值和无功强耦合与有功弱耦合有关, $\Delta P = 0$, 化简可得系统负荷无功功率与节点电压的增量关系为

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

式中, $J_R = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}$, J_R 为降阶的雅克比矩阵, 则系统的电压稳定性可由 J_R 的特征值与特征向量判断。这就是 $V-Q$ 模态法用于静态电压稳定性的基本原理。在系统稳定运行时, 有功功率对雅克比矩阵特征值的影响很小, 可以忽略不计, 但当系统运行点临界失稳点时, 其影响较大, 需要考虑, 需用有功功率变化影响的改进模态分析法^[14]。对 J_R 特征值进一步分解可得

$$J_R = \eta^{-1} \Lambda \eta \quad (4)$$

令 $\xi = \eta^{-1}$, 则有

$$J_R = \xi \Lambda \eta \quad (5)$$

式中, $\Lambda = \text{diag}\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n\}$; $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为 J_R 的特征根; η 为 J_R 的左特征向量; ξ 为 J_R 右特征向量。

将式 (5) 代入式 (3) 中得

$$\Delta V = \xi \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (6)$$

$$\Delta V = \sum_i \frac{\xi_i \eta_i}{\lambda_i} \Delta Q \quad (7)$$

式中, η_i 为左特征向量矩阵 η 的第 i 行; ξ_i 为右特征向量 ξ 的第 i 列。由式 (6) 得出

$$\eta \Delta V = \Lambda^{-1} \eta \Delta Q \quad (8)$$

令 $\eta \Delta V = \Delta v$, $\eta \Delta Q = \Delta q$, 则有

$$\Delta v = \Lambda^{-1} \Delta q \quad (9)$$

式中, Δv 、 Δq 分别为模态电压 v 和模态无功 q 的变化量。由式 (9), 对第 i 个模态有

$$\lambda_i \Delta v_i = \Delta q_i \quad (10)$$

当 λ_i 很小或接近于零时, 表征模态无功的微小变化将会导致模态电压的急剧变化, 即系统电压接近不稳定。

2.2 改进全模态分析法

由于该方法在分析电压稳定性时, 既考虑了电压幅值的稳定性, 还考虑了电压相角的稳定性, 所以称之为改进全模态分析法。其数学推导如下。

将式 (2) 表示的潮流方程化简为有功和无功

两部分, 即

$$\Delta P = J_{P\theta} \Delta \theta + J_{PV} \Delta V \quad (11)$$

$$\Delta Q = J_{Q\theta} \Delta \theta + J_{QV} \Delta V \quad (12)$$

对式 (12) 进行化简, 将 $\Delta \theta$ 表示为 ΔP 和 ΔV 的函数, 即

$$\Delta \theta = J_{P\theta}^{-1} \Delta P + J_{PV} \Delta V \quad (13)$$

将式 (14) 代入式 (13), 将 ΔV 表示为 ΔP 和 ΔQ 的函数, 即

$$\Delta V = -J_{RQV}^{-1} J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} \Delta P + J_{RQV}^{-1} \Delta Q \quad (14)$$

式中, $J_{RQV} = J_{QV} - J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} J_{PV}$, 为降阶无功雅克比矩阵, 即前面的 $V-Q$ 模态法推导的 J_R 。同理推出

$$\Delta \theta = J_{RP\theta}^{-1} \Delta P - J_{RP\theta}^{-1} J_{PV} \Delta Q \quad (15)$$

式中, $J_{RP\theta} = J_{P\theta} - J_{PV} J_{QV}^{-1} J_{Q\theta}$, 为降阶有功雅克比矩阵。

将式 (14)、式 (15) 合并, 得到

$$\begin{pmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} J_{RP\theta}^{-1} & -J_{RP\theta}^{-1} J_{PV} J_{QV}^{-1} \\ -J_{RQV}^{-1} J_{Q\theta} J_{P\theta}^{-1} & J_{RQV}^{-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (16)$$

式 (16) 为改进的全模态分析法的基本数学模型。

2.3 节点参与因子

由式 (7) 可得

$$\frac{\partial V_k}{\partial Q_k} = \sum_i \frac{\xi_{ki} \eta_{ik}}{\lambda_i} \quad (17)$$

式中, k 为节点编号; ξ_{ki} 为 ξ_i 的第 k 个元素; η_{ik} 为 η_i 的第 k 个元素。

根据 Gao 的定义^[4], 节点 k 对模态 i 参与因子定义为

$$P_{ki} = \xi_{ki} \eta_{ki} \quad (18)$$

在给定模式中, 节点参与因子的大小表示为使此模式稳定, 对该母线采取校正措施的有效程度。因此, 判定系统薄弱节点的问题就是寻找 J_R 的最小模特征根以及与此最小模特征根相关的各节点参与因子的较大者。

2.4 支路参与因子

模态分析定义支路 j 对模态 i 的参与因子为

$$P_{ki} = \frac{\Delta Q_{\text{loss},j}}{\Delta Q_{\text{loss},\max}} \quad (19)$$

式中, $\Delta Q_{\text{loss},j}$ 为支路 j 的无功损失量; $\Delta Q_{\text{loss},\max}$ 为所有支路的无功损失量的最大值。

支路参与因子表示对任一模式, 在给定无功负荷增量变化的情况下, 哪一条支路消耗了最多的无功功率。参与因子高的支路就是造成该模式变弱的支路。

2.5 发电机参与因子

由2.4节中支路参与因子同理可得出发电机 gk 对模式 i 的参与因子定义为

$$P_{ki} = \frac{\Delta Q_{gki}}{\Delta Q_{g\max i}} \quad (20)$$

发电机参与因子表示对任一模式, 为响应系统无功负荷的增量变化, 哪一台发电机提供了最多的无功功率输出。具有高参与因子的发电机在维持模式 i 的稳定方面发挥着很大的作用。

3 实例计算分析

3.1 某地区电网概况

以我国负荷中心的某地区电网2015年数据为例, 全系统共有781条母线, 20条500 kV高压交流线路; 负荷146个, 发电机37台, 变压器277台, 分为7个区域。在2015年夏平大方式下, 全网总出力为 $12\,579 + j2\,440.3$ (MV·A), 系统总负荷水平为 $12\,358.7 + j3\,812.3$ (MV·A)。其中, 全网出力包括了接受四川电网的出力 $2\,443 - j440$ (MV·A), 受电率为19.4%。

3.2 基于PV曲线的裕度分析

对电网所有主网中500 kV线路及变压器元件进行 $N-1$ 事故模拟, 全网 $N-1$ 后, 找出电压最低的带负荷节点得出PV分析的关键节点。然后对该系统当前运行方式下进行连续潮流分析, 得出关键节点的PV曲线, 图2、图3给出了此运行方式下渝长寿MDI110母线、渝玉带山110母线的PV曲线。由此得到系统的功率传输极限点, 计算出系统有功裕度指标 $K_p(\%) = 8.62$ 。由图2、图3可知, 不同节点的临界电压是不同的, 极限点电压高的节点无功补偿比较充足, 往往具有较大的功率裕度。

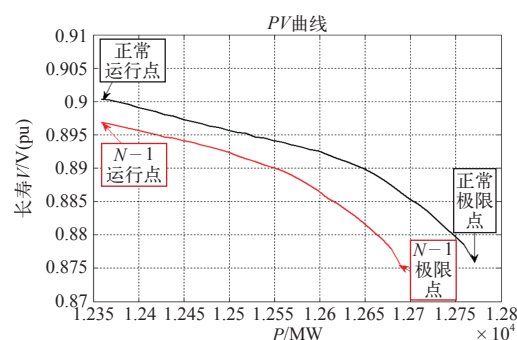


图2 长寿MDI110负荷节点的PV曲线

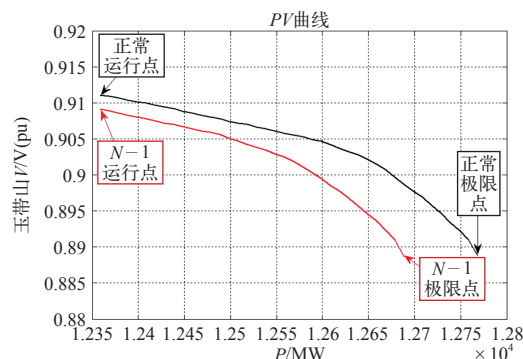


图3 玉带山110负荷节点的PV曲线

3.3 模态分析结果

分别用 $V-Q$ 模态法和改进的全模态法对该系统在当前运行状态和稳定极限状态进行模态分析, 计算出相应的母线、线路以及发电机参与因子的结果, 如表1~表3所示。

表1 母线相关因子部分主要结果

节点	初始点 $P_{ki} (\times 10^{-2})$	节点	极限点 $P_{ki} (\times 10^{-2})$
石马110	0.364	黔江110	4.529
南宾110	0.353	酉阳110	2.508
丰都110	0.319	秀山110	1.590
沙子牵220	0.312	酉阳220	1.363
石柱220	0.311	巨木岭220	1.302
石柱牵220	0.308	黔江220	1.280
南宾220	0.307	秀山220	1.050
石马220	0.300	彭水110	0.740
长寿110	0.293	清溪110	0.522
丰都牵220	0.292	江口220	0.464
丰都220	0.290	龙桥110	0.423
垫江110	0.288	清溪220	0.418
涪陵110	0.280	武隆110	0.392
龙桥110	0.279	中机龙桥220	0.391
清溪110	0.278	武隆220	0.337

表2 线路相关参与因子部分主要结果

运行点支路参与因子		极限点支路参与因子	
支路	P_{ki}	支路	P_{ki}
长合-珞璜	1.000 0	石马-南宾	1.000 0
垫江-石马	0.308 3	丰都-南宾	0.374 8
思源-江东	0.255 7	酉阳-秀山	0.296 8
白涛-龙桥	0.219 7	双桥-荣昌牵	0.280 8
长合-马岚垭	0.207 9	思源-高屋	0.236 9
陈家桥二-凉亭	0.143 7	巴山-高九路	0.219 2
龙井-黄荆堡	0.135 2	金龙-花园	0.200 1
江口-武隆	0.095 5	恒泰-万盛	0.182 9
彭水-黔江	0.089 7	涪陵-丰都	0.104 6
石马-南宾	0.084 4	陈家桥二-微家园	0.101 2

表3 发电机相关因子部分主要结果

发电机	初始点 $P_{ki} (\times 10^{-2})$	发电机	极限点 $P_{ki} (\times 10^{-2})$
石柱发电厂81	0.308	江口81	0.440
石柱发电厂82	0.308	江口82	0.440
龙桥热电	0.208	石柱发电厂81	0.590
川洪沟500-6	0.144	石柱发电厂82	0.590
川洪沟500-4	0.144	江口83	0.385
草街电站81t	0.092	龙桥热电81	0.337
江口83	0.064	银盘电站81t	0.120
川黄岩500-2	0.054	松溉发电厂81	0.030
川黄岩500-3	0.054	珞璜81	0.028
鄂龙泉500	0.053	珞璜82	0.028

3.4 计算结果分析

系统在初始运行状态下，其中最薄弱的节点是石马，且薄弱区域为以石柱、石马、垫江、丰都、南宾、江南、石柱牵和龙桥等以及以陈家桥二站、思源和玉带山等为中心的几个站构成了重庆电网的电压薄弱区域。

图4为正常运行状态下的薄弱区域。在极限点状态下高参与因子的母线分别为黔江、酉阳、秀山、彭水和武隆等。

图5为极限状态下的电压薄弱区域。可以看出，薄弱区域与运行点处基本一致，但是在极限运行方式下仍有以陈家桥二站、思源、微电园、凉亭和梨树湾等组成的陈家桥片区的薄弱区域。

由以上结果还可以看出，在初始状态下，110 kV的母线节点的参与因子排在前边，这就是说电网一旦失稳，最先崩溃的节点同其所在的电压等级没有关系，电网很有可能从低电压等级的母线最先开始电压失稳。

4 结束语

提出了一种基于PV曲线与改进模态法综合应用的方法来确定实际电网电压薄弱区域的方法。

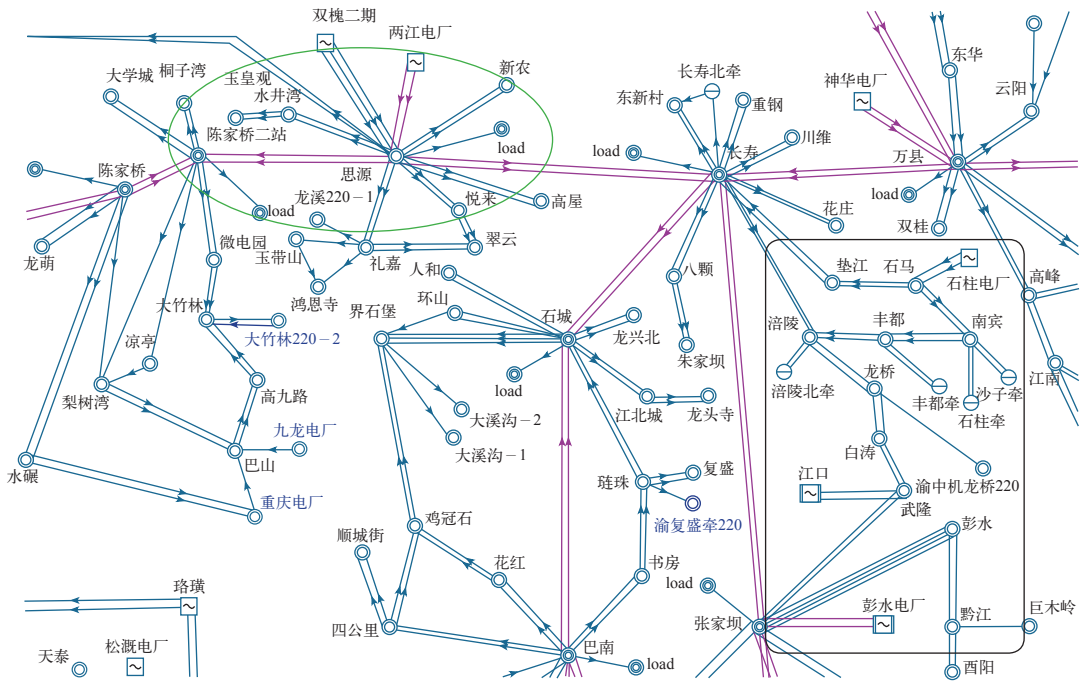


图4 正常运行时系统的薄弱区域

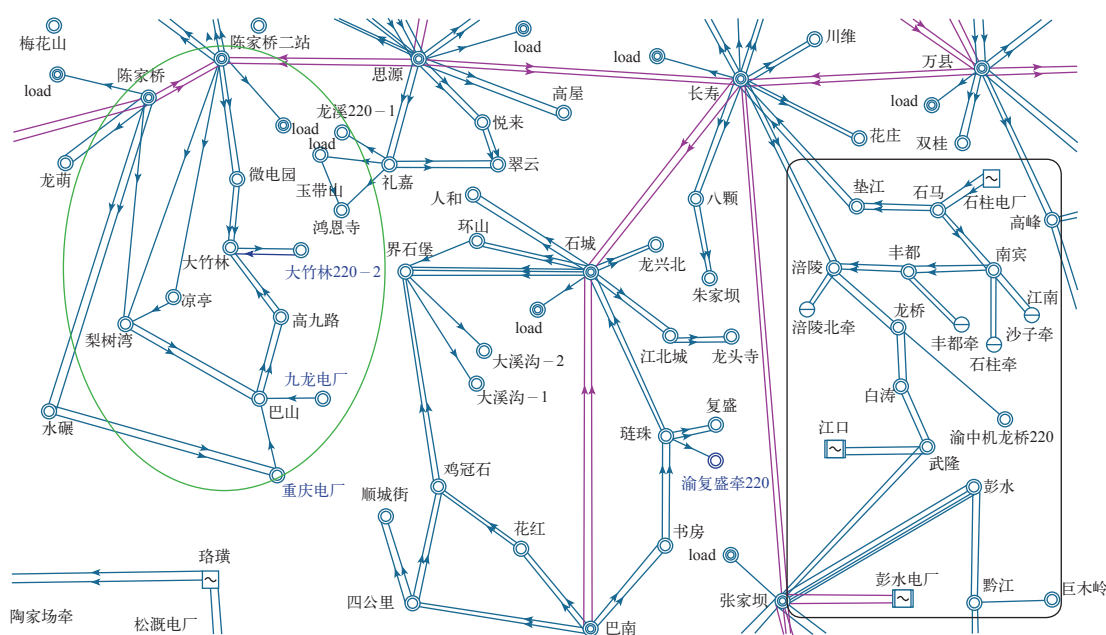


图5 极限运行时系统的薄弱区域

分别采用 $V-Q$ 模态法和改进的全模态法计算当前运行点和极限点最小模特征值下各个节点、支路和发电机的参与因子,找出系统中的薄弱区域。该方法既克服了 PV 分析计算全网 $N-1$ 有功裕度、无功电压灵敏度指标方法计算量大、信息较少及缺乏系统性的缺点,又克服了单一传统模态法仅得出当前运行点的负荷节点信息以及忽略有功功率变化的影响。因此,该方法可以准确计算出系统在各个负荷水平下的电压薄弱区域。采用该方法针对某地区电网进行了电压稳定性评估,计算结果与实际情况相符。 PV 曲线可快速、准确地求得系统最大负荷点和极限运行点,判断系统稳定裕度; $V-Q$ 模态法以及改进的模态方法结合可以很好地定位电压稳定的薄弱区域,能有效地为运行控制人员提供某一时刻或者断面最有可能发生电压崩溃的节点和区域,可指导运行人员对关键支路和发电机进行相应操作,及时调整潮流分布和安排无功储备,从而有效改善系统电压的稳定性。

参考文献

[1] 唐斯庆,张弥,李建设,等.海南电网9·26大面积停电事故的分析与总结[J].电力系统自动化,2006,30(1):1-7,16.

[2] 傅书遇. IEEE PES 2004会议电网安全问题综述及防止大面积停电事故建议[J]. 电力系统自动化,2008,29(8):1-4.

[3] 张建华,张国华,杨京燕. 基于PSASP的廊坊电网静态电压稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(5):1-6.

[4] 李增国,王锐,邢卫荣. 基于连续潮流和模态分析的电压稳定分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(9):1-6.

[5] Carson W Taylor. Power system voltage stability[M]. 北京:中国电力出版社,2002.

[6] 王建波,韩金铜,张玉红,等. 应用静态分析方法确定天津电压薄弱区域的研究[J]. 电力科学与工程,2011,27(10):1-5.

[7] 陈敏. 基于最小奇异值灵敏度的静态电压稳定分析与研究[D]. 武汉:华中科技大学,2007.

[8] 孙建生,侯志俭,王承民. Arnoldi算法在电力系统静态电压稳定性分析中的应用[J]. 电力系统自动化学报,2005,10(17):79-81.

[9] 李国庆,李小军,彭晓洁. 计及发电报价等影响因素的静态电压稳定分析[J]. 中国电机工程学报,2008,28(5):35-40.

(下转第28页)

零序阻抗则基本不受影响。这些仿真特征为下一步研究换相失败对交流保护的影响奠定了基础。

参考文献

- [1] 陈磊, 张侃君, 夏勇军, 等. 基于ADPSS的高压直流输电系统机电暂态-电磁暂态混合仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(12): 136-142.
- [2] 于占勋, 朱倩茹, 赵成勇, 等. 高压直流输电换相失败对交流线路保护的影响(一)含直流馈入的山东电网EMTDC建模与仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 58-64.
- [3] 唐宝锋, 孙运利, 范辉, 等. 基于ADPSS的线路保护数字建模方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 66-71.
- [4] 朱旭凯, 周孝信, 田芳, 等. 基于电力系统全数字实时仿真装置的大电网机电暂态-电磁暂态混合仿真[J]. 电网技术, 2011, 35(3): 26-31.
- [5] 郭小江, 邵瑶, 周勤勇, 等. 多馈入直流地区电网安全稳定性研究[R]. 北京: 中国电力科学研究院, 2010.
- [6] 浙江大学发电教研组直流输电教研组. 直流输电[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [7] 徐政, 蔡晔, 刘国平. 大规模交直流电力系统仿真计算的相关问题[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 4-8.
- [8] 邵震. 高压直流系统换相失败对交流侧继电保护的影响[J]. 南方电网技术, 2007, 1(1): 77-80.
- [9] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [10] 赵晚君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [11] 岳程燕, 田芳, 周孝信, 等. 电力系统电磁暂态机电暂态混合仿真接口实现[J]. 电网技术, 2006, 33(4): 6-10.
- [12] 张晋华, 蒋卫平, 印永华. 特高压规划电网安全稳定性研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(22): 64-68.
- [13] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [14] 卢睿. 多馈入直流对华东电网稳定性影响研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 卫鹏, 汪成根, 周前, 等. 基于ADPSS的锦苏特高压直流接入的江苏电网机电-电磁混合建模与仿真[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 20-25.
- [16] 柳勇军. 电力系统机电暂态和电磁暂态混合仿真技术的研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [17] 高翔, 高伏英, 杨增辉. 华东电网因直流故障的频率事故分析[J]. 电力系统自动化, 2006, 39(12): 102-107.
- (收稿日期: 2015-06-05) EA
- (上接第21页)
- [10] 徐琼璟, 徐政. 基于PSS/E的动态无功补偿装置机电暂态仿真模型[J]. 南方电网技术, 2008, 2(5): 39-42.
- [11] 马幼捷, 张继东, 周雪松, 等. 特征结构分析法对风电系统静态电压稳定的研究[J]. 中国电力, 2008, 41(3): 87-92.
- [12] 韩光, 丁晓群, 侯学勇. 考虑负荷类型和发电机节点的模态分析[J]. 电气应用, 2007, 26(1): 1-4.
- [13] 姜一涛, 毛王清, 杨明玉. PV曲线与模态法联合应用分析电网静态电压稳定性[J]. 电网技术, 2014, 42(12): 1-4.
- [14] 牛朋超. 基于模态分析理论的电力系统电压稳定性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2010.
- [15] 肖盛, 张建华, 郭世繁. 基于模态法的静态电压稳定性分析[J]. 电网与清洁能源, 2013, 26(6): 1-4.
- [16] 侯晨伟, 陈丽. 确定电网电压薄弱区域分析方法研究[J]. 华北电力大学学报, 2012, 38(3): 1-6.
- [17] 刘冀生, 严凤, 韩金铜, 等. 一种利用静态稳定分析确定电压薄弱区域的方法[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(9): 1-5.
- (收稿日期: 2015-07-10) EA