

基于电压稳定临界状态分区的无功源配置

李 玮, 方 鹤 飞

(浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:为解决无功功率不能远距离传输的问题,提出了在大电网电压稳定分区的基础上合理地配置无功源。首先,将分区点设定为电压稳定临界状态点,采用聚类分析的方法计算分区结果。然后,利用节点的无功裕度在电网拓扑中的分布,将各分区内无功裕度最小的节点作为无功源配置点。最后,采用 Matlab 软件对 IEEE30 节点系统进行了仿真,分别将所提方法与“未分区、直接按照无功裕度大小配置”的方法作比较。结果表明,该方法在应对临界状态时系统的无功控制更加可靠,故其对于提高系统电压的稳定性效果更好。

关键词:无功裕度;电压稳定临界状态分区;电压稳定

中图分类号:TM714

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2011)08-1025-03

Confirmation of reactive power sources based on critical point of voltage stability area

LI Wei, FANG Ge-fei

(Department of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to solve the problem that reactive power can't be transported for long distances, a thought was proposed that it was best to allocate reactive power sources based on critical point of voltage stability area. Firstly, the partition point was fixed at the critical point of voltage stability, which could make sure of the stability of networks under the partition control. Secondly, the reactive power margin of nodes was computed, and the minimal reactive power margin of each area was defined as the location of reactive power sources. Then, it was applied on IEEE30-nodes system by using Matlab, and compared with the method also using reactive power margin without partitioning with the above thought. The simulation results indicate that the analysis raises the reliability of volt/var control better when facing with the critical state, and improves the voltage stability of system better.

Key words: reactive power margin; critical point of voltage stability area; voltage stability

0 引 言

为保证电网运行的经济性,电力系统的最优控制策略通常让系统运行在极限状态,这样就严重减小了系统运行的稳定裕度。特别是大型风电机组的并网,可引起系统无功的变化,从而导致接近风电场的电力网薄弱区域电压质量严重下降。随着电网结构的扩大,用电负荷的增加,电压稳定问题已日益突出。解决该问题的根本就是要给系统合理地进行无功配置。

无功配置最重要的就是确定无功源的配置地点,国内外学者们也针对该点作出了大量研究。文献[1]将分支定界法和遗传算法相结合,以系统投资最小为

目标,提出了确定无功源数量与地点的方法。文献[2]提出了基于先导节点的无功源最佳配置地点的选择方法,使用 Greedy 算法确定先导节点集,计算量小,但先导节点集的确定是否准确将直接影响无功源的配置地点。文献[3]从无功补偿点的补偿效应出发,运用灵敏度法确定无功补偿地点,该方法考虑了电压与无功的紧密联系,提高了系统的电压稳定性。文献[4]在电力系统分区的基础上,将不含 PV 节点的分区数作为无功源配置点的个数,将各分区内电压稳定灵敏度最大的节点作为无功源配置点,该方法对于复杂的大电网较为适用,但过于依赖分区的结果。文献[5]提出了无功裕度的概念,利用节点无功裕度的大小确定电力系统无功补偿点,该方法充分考虑了电网

收稿日期:2010-12-10

作者简介:李 玮(1986-),女,江苏徐州人,主要从事电力系统电压稳定与无功控制方面的研究. E-mail: vivian.li.zju@gmail.com

结构本身所具有的无功“补偿”能力,最直接地反映出需要无功补偿的节点,但所确定的无功补偿点可能出现集中分布的现象,无法做到无功均匀配置。

总结以上方法的优缺点,笔者提出在大电网电压稳定分区的基础上进行无功源配置的基本思想。本研究采用欧式电气距离计算分区,在电压稳定临界状态点^[6]进行分区。计算各节点的无功裕度,与相应的分区结果结合,得到各区域内节点无功裕度的分布情况。通过对 IEEE30 节点系统的仿真计算,将所提方法与单纯利用无功裕度排序的方法进行比较,体现出该方法更能提高系统的电压稳定裕度,保证系统稳定运行。

1 电压稳定临界状态点分区

1.1 电气距离

将电网分区基本是利用电气距离^[7]的概念,电气距离矩阵一般由系统的潮流计算给出。采用常规的牛顿-拉夫逊法推导出的潮流方程如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial \theta} & \frac{\partial P}{\partial V} \\ \frac{\partial Q}{\partial \theta} & \frac{\partial Q}{\partial V} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H & N \\ K & L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (1)$$

为简化计算,本研究假设各节点的注入有功功率不变,即 $\Delta P = 0$,则上式可化简为:

$$\Delta V = (L - KH^{-1}N)^{-1}\Delta Q = S\Delta Q \quad (2)$$

式中: S —电压无功灵敏度矩阵。

为满足两点间的距离对称性^[8],本研究采用系统电压衰减矩阵 $\alpha_{ij} = S_{ij}/S_{ji}$ 。

为了能够表达出当系统中节点 k 发生电压变化时,对节点 i 、 j 之间电气距离的影响,引入欧氏电气距离^[9]:

$$D_{ij} = [(\alpha_{i1} - \alpha_{j1})^2 + \dots + (\alpha_{ik} - \alpha_{jk})^2 + \dots + (\alpha_{in} - \alpha_{jn})^2]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

1.2 电压稳定临界状态点分区

采用电压稳定临界状态点进行分区,不同于一般研究在正常状态点的分区,前者基于系统电压稳定的概念,在分区的过程中考虑了电网从正常状态到临界状态都可以稳定运行的情况。文献[6]引入集合的概念,定义稳定状态集合来分析电压稳定临界状态点分区的优势,如图 1 所示。稳定状态集合 A 代表按照电压稳定临界状态点进行分区时所能保证系统维持在稳定状态的集合,稳定状态集合 E 代表按照正常状态点分区时所能保证系统维持在稳定状态的集合,显然集合 A 远大于集合 E ,集合 A 外均为不稳定状态集合,说明在电压稳定临界状态点进行分区控制效果最佳。文献[6]分别采用扰动法和 F 值在 IEEE30 节点系统上

验证了该观点的正确性。

确定分区点是生成分区结果的基础,文中将采用负荷节点电压稳定性就地安全指标 A_{VM} 求解电力系统临界状态点^[9]。聚类分析用于分区问题已有很多的研究成果,层次聚类算法^[10]是众多聚类分析算法中较为常用的一种,利用电气距离将电网的节点以类的概念合并在一起,这与电力系统的分区思想相一致。文献[11]提出的免疫中心点聚类算法在收敛性和初始中心选择上具有一定的先进性,为了保证分区结果更加精准,将采用此法进行电压稳定临界状态点分区。

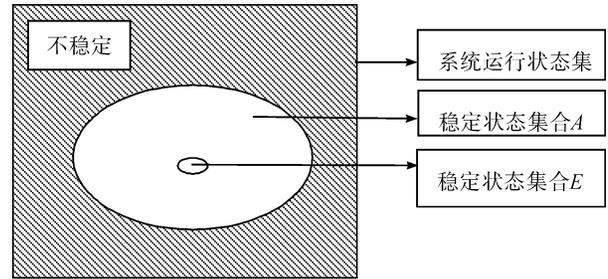


图 1 系统运行状态集合

2 无功源配置点的确定

2.1 无功裕度

简单交流支路如图 2 所示,功率流动由送端 S 指向受端 R 。

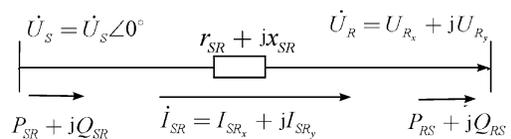


图 2 简单交流电路

文献[12]由一系列推导得出受端 R 的功率在静态稳定状态下的标准圆形式分别为:

$$\left[U_{R_x} - \frac{U_S}{2} \right]^2 + \left[U_{R_y} + \frac{b}{2g} U_S \right]^2 = \frac{U_S^2}{4} + \frac{b^2 U_S^2}{4g^2} - \frac{P_{RS}}{g} \quad (4)$$

$$\left[U_{R_x} - \frac{U_S}{2} \right]^2 + \left[U_{R_y} - \frac{g}{2b} U_S \right]^2 = \frac{U_S^2}{4} + \frac{g^2 U_S^2}{4b^2} - \frac{Q_{RS}}{b} \quad (5)$$

可以看出,上面两个功率圆的半径分别为:

$$r_P = \sqrt{\frac{U_S^2}{4} + \frac{b^2 U_S^2}{4g^2} - \frac{P_{RS}}{g}} \quad (6)$$

$$r_Q = \sqrt{\frac{U_S^2}{4} + \frac{g^2 U_S^2}{4b^2} - \frac{Q_{RS}}{b}} \quad (7)$$

则有功率圆与无功功率圆的圆心距离为:

$$D = \frac{g^2 + b^2}{2gb} U_s \quad (8)$$

文献[5]根据两圆有交点的两个极限情况—内切与外切,结合系统在正常运行点与临界崩溃点的电气特点,给出了无功裕度的定义,其表达式为:

$$Q_{RPM} = r_P + r_Q - D \quad (9)$$

其中,对应每个节点 i 的无功裕度为:

$$Q_{RPM_i} = \sum_{j=1}^{N_i} r_{P_{ij}} + r_{Q_{ij}} - D_{ij} \quad (10)$$

式中: N_i —与节点 i 相连的支路数, j —与节点 i 相连的节点号。

2.2 无功源配置点的确定

节点无功裕度的大小反映了该节点应对系统无功变化的能力,无功裕度较小的节点则说明其更需要无功补偿。本研究根据式(10)计算各节点的无功裕度,结合分区的结果,将各个区域内所包含的节点按照无

表 1 IEEE30 节点系统五分区节点无功裕度排序分布

无功裕度区间	第一分区	第二分区	第三分区	第四分区	第五分区
[0, 40)		6	12, 10	19, 16, 17	30, 27
[40, 80)	5	28	15, 25, 24	22	29
[80, 120)	7,	8	20, 14	21, 9, 26	
[120, 160)	2, 4			11, 18, 13	
[160, 200)	3, 1		23		

分析表 1 可知,节点 6、12、19、30 分别是各自区域内无功裕度最小的点,可确定为无功源配置点;而其他分区的节点无功裕度均分布在 [0, 40) 以外各段,故不考虑其分区内的节点。

3.2 结果分析

为了表明笔者所提研究方法的可行性,本研究将在各点安装 SVC 计算仿真结果。现确定两个比较方案,由该研究方法确定的无功源配置点为节点 6、12、19、30,作为方案一;若不分区直接按照无功裕度排序最小的 4 个节点分别是 30、19、6、27,设为方案二的 4 个无功源配置点,分别安装相同系数的 SVC。

本研究将增负荷中心节点 16 和 22 的无功功率增加至临界状态附近,重新计算 IEEE30 节点系统的潮流值。比较方案一和方案二在 SVC 投入前后系统运行的经济性与稳定性,如表 2 所示。

方案一在比较表 2 中各参数后明显优于方案二,尤其是补偿后的静态负荷裕度,方案一的补偿效果更加显著,说明在电压稳定临界状态分区内配置无功源更能保证系统在扰动消除后稳定运行。由表 1 可看出,节点 30 和节点 27 在电气特性上具有相似性,故划分在同一区域内。而方案二在这两个节点均配置 SVC,造成重复补偿的情况导致系统运行的不经济,而

功裕度从小到大的顺序重新排列,在区域内部确定无功裕度最小的点作为各分区的无功源配置点。这样可以让每个区域都得到均匀无功补偿,避免了相邻节点重复配置。下面将以 IEEE30 节点系统为例,分析说明上述配置方法的可行性。

3 算例分析

3.1 算例结果

本研究按照笔者提出的方法确定无功源地点,以 IEEE30 节点系统为例,采用免疫中心点聚类算法在电压稳定临界状态点将其划分为 5 个分区。本研究计算各个节点的无功裕度,在 [0, 200) 内将其划分成 5 个区间。再将每个区域内的节点按照无功裕度区间从小到大进行排列,得到 IEEE30 节点系统的五分区无功裕度节点分布情况,如表 1 所示。

在分区内合理选择无功源配置点,能够避免无功浪费的情况。

表 2 两种方案的比较结果

	网络损耗 /MW	最大电 压偏移	静态负 荷裕度
方案一	16.9	0.029	0.174
方案二	20.5	0.032	0.066

4 结束语

笔者通过对电压稳定分区内无功源配置方法的研究,挖掘到真正需要无功补偿的节点。研究表明,该方法对于大电网的无功控制易于实现,为实施电压无功控制策略奠定了可靠的电压稳定基础,能更好地保证系统稳定运行。

参考文献 (References):

- [1] MAURIZO D, GIANPIETRO P, GRANELLI M. Optimal capacitor placement using deterministic and genetic algorithms [J]. *IEEE Transaction on Power Systems*, 2000, 15(3):1041-1046.

(下转第 1032 页)

4.3 性能参数总结

在对设计进行系统仿真验证的基础上,笔者又进一步对参数进行总结,具体仿真数据如表 1 所示。

表 1 电路的设计参数与指标

参数	说明	仿真值	单位	条件
V_N	输入电压范围	40 ~ 625	V	直流输入电压
I_{INsd}	芯片静态电流	377	μA	$V_{IN} = 625 V$
VCC	在预稳压电路中产生,用以驱动外部 MOS 管	15	V	
V_{CS}	RCS 上的反馈电压	250	mV	
OT	过温保护阈值与迟滞	136	$^{\circ}C$	温度保护阈值
		103	$^{\circ}C$	温度保护迟滞
f_{osc}	时钟频率	25.6	ns	$R_{IOSC} = 1 M\Omega$
		247	ns	$R_{IOSC} = 100 k\Omega$

5 结束语

由于 SOI 工艺中,内部器件能相互隔离,在进行高压电路设计时能完全把高压部分与低压部分衬底完全隔离。本研究在设计中采用了最高耐压可达 650 V 的超高耐压 LDMOS 管,预定的输入电压范围为 40 V ~ 625 V。电路采用峰值电流模式控制,并提供线性与 PWM 两种调光方式。仿真与测试结果表明,所设计的 LED 驱动具有良好的性能。目前市场上鲜有基于 SOI 工艺的 LED 驱动芯片,该设计开创了这一领域的先河。该 LED 驱动在大的输入电压范围以及大的负载电流变化范围内均能正常工作。

参考文献 (References):

[1] 薛龙来,郭宇锋,周井泉,等. 具有倾斜表面漂移区的 SOI LDMOS 的工艺设计[J]. 微电子学, 2010, 40(2):

300-304.

[2] CHEN Xin. Development strategies with SOI technology [J]. **Chinese Journal of Electron Devices**, 2010, 33(2): 193-196.

[3] DEJULE R. SOI 技术成为主流[J]. 集成电路应用, 2009(6):27-30.

[4] CAI Jin, REN Zhi-bin, MAJUMDAR A, et al. Will SOI have a Life for the Low-power Market [C]// 2008 IEEE International SOI Conference Proceedings. New Paltz, NY: [s. n.], 2008: 15-16.

[5] LUO Xiao-rong, ZHANG Wei, GU Jing-jing, et al. A new double gate SOI LDMOS with a step doping profile in the drift region[J]. **Journal of Semiconductors**, 2009, 30(8): 1-4.

[6] 李家贵,李德昌. SOI LDMOS 晶体管的自加热效应[J]. 电子科技, 2009, 22(4): 72-74.

[7] 程新红,杨文伟,宋朝瑞,等. SOI LDMOS 功率器件的研究与制备[J]. 微处理机, 2007, 28(2): 11-13.

[8] 吴秀龙,陈军宁,孟 坚,等. SOI LDMOS 晶体管耐压结构的研究[J]. 半导体技术, 2005, 30(3): 27-31.

[9] 段宝兴,张 波,李肇基. 高压 SOI LDMOS 设计新技术—电场调制及电荷对局域场的屏蔽效应在高压 SOI LDMOS 设计中的应用[J]. 微电子学, 2007, 37(4): 459-465.

[10] LUO Xiao-rong, LEI Tian-fei, WANG Yuan-gang, et al. A Novel high Voltage SOI LDMOS with buried N-layer in a Self-isolation high Voltage integrated Circuit [C]//Proceedings of The 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices & ICs. Hiroshima: [s. n.], 2010: 265-268.

[11] 张 恒,刘高进,郭生霞. 电火花脉冲电源检测识别系统的设计与仿真[J]. 轻工机械, 2009, 27(6): 52-54.

[编辑:张 翔]

(上接第 1027 页)

[2] 姚小寅,孙元章,王志芳. 电力系统无功源最佳配置地点的研究[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(3): 12-15.

[3] 刘君华,方鸽飞,吕岩岩. 基于灵敏度法确定无功补偿地点[J]. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(4): 58-61.

[4] 胡彩娥,杨仁刚. 用电力系统分区方法确定无功源最佳配置地点[J]. 电力系统及其自动化学报. 2004, 16(3): 46-49.

[5] 刘传铨,张 焰. 电力系统无功补偿点及其补偿容量的确定[J]. 电网技术, 2007, 31(12): 78-81.

[6] 方鸽飞,李 玮. 电力系统电压稳定临界状态的电压控制分区[C]// Power and Energy Engineering Conference. Wuhan: [s. n.], 2010: 453-457.

[7] LAGONOTTE P. Probabilistic Approach of Voltage Control based on Structural Aspect of Power Systems[C]//Third International Conference on Prbabilistic Methods Applied to Blectric

Power SysTems 1991. London: [s. n.],1991:208-213.

[8] 杨秀媛,董 征,唐 宝. 基于模糊聚类分析的无功电压控制分区[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(22): 6-10.

[9] 周双喜,姜 勇,朱凌志. 电力系统电压稳定性指标述评[J]. 电网技术, 2001, 25(1): 1-7.

[10] 郭庆来,孙宏斌,张伯明. 基于无功源控制空间聚类分析的无功电压分区[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 36-40.

[11] 熊虎岗,程浩忠,孔 涛. 基于免疫—中心点聚类算法的无功电压控制分区[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(2): 22-26.

[12] 卢志强,卢 勇,李盛林. 电力系统无功补偿点的确定及其补偿方法[J]. 电力电容器, 2002, 2(2): 8-11.

[编辑:张 翔]