

分区电网结构对受电极限的影响分析

赵 瑞¹, 张再驰¹, 王 卫¹, 彭 龙², 潘 艳², 郭秋婷²

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100220; 2. 南京南瑞集团公司北京监控技术中心, 北京 100220)

摘 要: 受端电网不同分区结构对其受限方式影响较大。比较了分区的两种受限方式热稳定极限和静态电压稳定极限, 得到了受限方式随分区结构的变化规律。结合实际分区电网的特点, 对分区网络进行合理简化, 采用阻抗模指标计算出静态电压稳定极限, 与分区变压器制约下的热稳极限对比得出分区受限方式, 分析了线路长度、变电站容量、负荷功率因数和分区内部电源接入情况对受限方式的影响。根据实际电网仿真验证了分析过程和规律的正确性, 可为电网分区规划运行提供一定的技术参考。

关键词: 静态电压稳定; 受电极限; 分区电网; 热稳定极限

Abstract: The different district structures of receiving-end grid have a great influence on its constrained modes. The thermal stability limit and static voltage stability limit of two constrained modes are compared, and the variation of constrained modes along with the district structures is obtained. Combined with the characteristics of an actual district grid, the district grid is simplified reasonably. The static voltage stability limit is calculated using impedance module indicator, and then is compared with the thermal stability limit controlled by district transformer to get the constrained modes. The influences of line length, substation capacity, load power factor and district internal power supply access on the constrained modes are analyzed. Based on the simulation of an actual power grid, the correctness of analysis process and rules is verified, which can provide a technical reference for the district planning of grid operation.

Key words: static voltage stability; power-receiving limit; district grid; thermal stability limit

中图分类号: TM71 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)02-0049-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.02.012

0 引 言

分层分区运行方式下的大型受端电网中, 电压稳定将成为限制电网安全稳定运行的关键因素, 同时受电极限也受分区变压器热稳制约^[1-3]。研究分区电网不同网架结构下受限方式, 有针对性制定措施对提高受电极限有实际意义。

热稳定主要考虑变压器 $N-1$ 后决定分区受电极限, 不同网络结构主要体现在分区变压器台数和功率分配上。静态电压稳定限制下的分区受电极限影响因素较多, 目前电网多采用分层分区的运行方式, 分区内部 500 kV 主网中的关键设备、输送通道或者分区内大电源停运都将给相关 220 kV 分区电网的电压稳定性带来较大程度的威胁^[4-5]。目前电力系统电压稳定问题的研究方法主要有静态和动态分析方法, 动态分析结果较为精确, 但计算时间

长^[6-7]。静态稳定分析方法计算量小, 在一定程度上能够较好地反映系统的电压水平, 因此得到广泛的应用。文献 [8-9] 总结各种静态电压稳定指标的优缺点和适用条件, 文献 [10] 研究了不同模型对静态电压稳定裕度的影响。考虑到实际电网, 文献 [11] 结合不同分区电网的特点, 仿真分析了影响分区电压稳定极限的各个因素, 但其并没有分析电网结构对电压稳定极限的影响。综上所述, 如何结合实际电网结构, 合理地建立分区模型, 分析影响分区受电极限的关键因素具有实际意义。

通过对实际电网分析, 考虑主要元件对分区电网进行合理简化, 运用阻抗模指标求解静态电压稳定极限, 并结合分区热稳定, 给出不同网络结构下分区受限方式, 并给出了受限方式与分区主变数量之间的变化规律, 可为电网分区规划运行提供一定的技术参考。

1 电压稳定极限理论计算方法

系统的等值模型如图 1 所示,设网络等值阻抗为 $Z_s = Z_s \angle \beta - R + jX$, 负荷阻抗为 $Z_L = Z_L \angle \theta$ 。

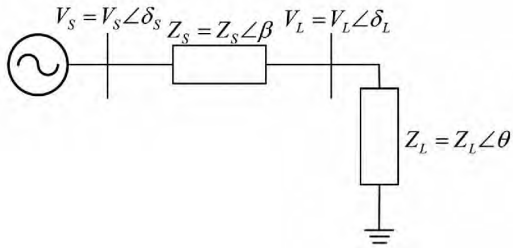


图 1 系统等值图

则负荷功率为

$$P_L = \frac{V_s^2 Z_L \cos \theta}{(Z_s \cos \beta + Z_L \cos \theta)^2 + (Z_s \sin \beta + Z_L \sin \theta)^2}$$

式中: V_s 为电源电压; θ 为给定负荷功率因数。负荷吸收最大功率时满足

$$\frac{\partial P_L}{\partial Z_L} = 0 \tag{1}$$

求解为

$$Z_L = Z_s \tag{2}$$

通过式(2)可知,当负荷阻抗和线路阻抗模值相等时,负荷吸收功率达到极限。此时功率最大值为

$$P_L^{\max} = \frac{V_s^2 \cos \theta}{2Z_s [1 + \cos(\beta - \theta)]} \tag{3}$$

若忽略线路电阻,系统侧电压取 1, 则

$$P_L^{\max} = \frac{\cos \theta}{1 + \sin \theta} \times \frac{1}{2X} \tag{4}$$

2 分区电网电压稳定极限计算

2.1 分区模型建立

分区电网由 500 kV 变电站、分区内部电源和分区电网结构组成,如何将复杂的分区网络合理简化对于分区静态电压稳定极限的分析计算起关键作用。

这里建立了分区模型,如图 2 所示。一个 500 kV 变电站经过 220 kV 线路与分区内部电源经过 220 kV 线路并联,再通过 220 kV/110 kV 变压器与负荷相连。

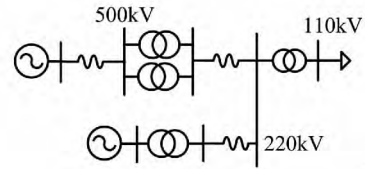


图 2 系统模型

上述系统等值的电路如图 3 所示,图中 V_{s1} 和 V_{s2} 分别为分区外系统等值电源的电压和分区内电源机端等值电压,取幅值为 1, 则两处电源等效合并在一起,如图 4 所示。

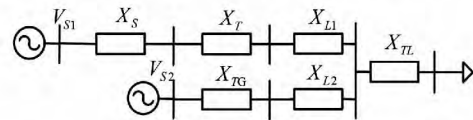


图 3 等值电路模型

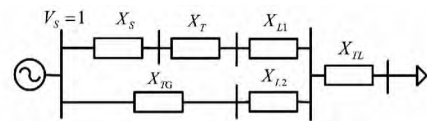


图 4 等值电路模型

图中: X_s 为 500 kV 变压器外部系统等值电抗; X_T 为分区变压器等值电抗,取值为分区所有 500 kV 变压器的并联电抗; X_{TL} 为负荷侧 220 kV/110 kV 等值变压器电抗; X_{L1} 为 500 kV 变压器到负荷侧 220 kV 变压器之间线路等值电抗,负荷一般通过 2~3 段线路与 500 kV 变压器低压侧相连,选取线路长度的平均值的 2 倍作为其等效距离; X_{L2} 为分区内电源到负荷侧 220 kV 变压器线路等值电抗。与分区变压器相比,分区内部电源和负荷之间的距离较近,且通常一个电源功率输送给周边多个负荷,因此其等效的电气距离较短,选取其等效距离为 X_{L1} 的 1/2, T_{TG} 为分区内电源升压变压器等值电抗,根据分区内电源容量确定。

设分区发电量为 S_C , 负荷为 P_L , 忽略损耗,以变压器 $N-1$ 后变压器满载时的负荷量确定 220 kV/110 kV 变压器容量时有

$$P_L = S_C + (N-1) S_N \tag{5}$$

因此图中各参数为

$$X_s = \frac{1}{I_s}$$

$$X_T = U_{KT} \% \times \frac{S_B}{(N-1) S_N}$$

$$X_{L1} = X_L \times L1$$

$$X_{L2} = X_L \times L2$$

$$X_{TL} = U_{kL} \% \times \frac{S_B}{P_L}$$

$$X_{TC} = U_{kG} \% \times \frac{S_B}{S_G} \quad (6)$$

式中: I_S 为 500 kV 变压器高压侧三相短路电流标么值; X_L 为每公里电抗标么值; $L1$ 和 $L2$ 分别对应相应线路阻抗长度; $U_{KT} \%$ 、 $U_{KG} \%$ 和 $U_{kL} \%$ 分别为 500 kV 变压器、分区内部电源升压变压器和负荷侧变压器的短路电压百分比。设线路热稳为 P_t , 则单台 500 kV 变压器 220 kV 线路出线回数 N_{L1} 按式 $N_{L1} \geq \frac{S_N}{P_t}$ (N_{L1} 取其范围内最大整数) 确定; 分区内电源变压器台数 N_c 通过式 $N_c \geq \frac{S_G}{S_n}$ (N_c 取其范围内最大整数) 确定; 分区内部电源变压器出线回数按式 $N_{L2} \geq \frac{S_N}{P_t}$ (N_{L2} 取其范围内最大整数) 确定; 考虑负荷功率因数为 θ , 则负荷侧外的系统等值电抗 X 为

$$X = (X_S + X_T + X_{L1}) // (X_{TC} + X_{L2}) + X_{TL} \quad (7)$$

因此可得负荷极限为

$$P_L^{\max} = \frac{\cos\theta}{1 + \sin\theta} \cdot \frac{1}{2 [(X_S + X_T + X_{L1}) // (X_{TC} + X_{L2}) + X_{TL}]} \quad (8)$$

2.2 模型验证

选取北京电网验证模型的准确性, 北京电网包括 6 个分区, 分区变压器台数 3~6 台, 负荷功率因数 0.98, 仿真选择负荷按固定功率因数增长方式, 负荷为恒功率模型。取电网典型参数 $S_B = 1\ 000$ MVA, $U_B = 525$ kV, 系统侧短路电流 $I_S = 50$ kA, 因此可得 $X_S = 0.02$ 。500 kV 变压器、分区内部电源升压变压器选择 $U_k \% = 0.15$, 负荷侧变压器的 $U_k \% = 0.12$, $X_L = 0.006$ p. u. /km, 负荷侧变压器容量 $S_n = 300$ MVA, 每条线路热稳极限为 300 MW, 北京电网线路平均长度 10 km, $L1$ 取 20 km, $L2$ 取 10 km, 因此可根据不同分区发电量和负荷量计算静态电压稳定极限。计算朝顺通分区正常方式下、安兴分区在兴都 1 号变压器检修方式下、昌城分区海淀 2 号变压器检修方式下、通安分区新通 2 号变压器检修方式下和兴房门分区门头 2 号变压器检修方式下的静态电压稳定极限, 理论计算和仿真结果如表 1 所示。

由表 1 可知, 理论模型和实际仿真间误差在 10% 以内, 满足工程计算的要求。此外, 分区等值模型为单通道结构, 朝顺通分区正常运行方式下其结构为 3 个变电站带一片负荷区域, 其误差为 1.3%,

因此可知对于静态电压稳定极限计算而言, 分区由多通道供电的结构并不会增大等值模型的误差。

表 1 理论和仿真计算对比 /MW

分区	计算方式	理论计算	仿真计算	误差
朝顺通	正常方式	3 950	3 900	1.3%
安兴	兴都 1 号变压器检修	2 038	1 860	9.2%
昌城	海淀 2 号变压器检修	2 390	2 300	3.9%
兴房门	门头 2 号变压器检修	3 100	3 400	8.8%

2.3 电压稳定约束下的受电极限

通过上述模型可知, 由电压稳定约束下的下网极限 P_{\max} 为

$$P_{\max} = P_L^{\max} - P_G$$

首先分析分区发电量对其影响, 图 5 为负荷极限和分区下网极限随分区发电量的变化曲线。由图中可知随着分区发电量的增加负荷极限增加, 但是下网极限却随之而降低, 因此可知在其他网络不变的情况下, 分区电源的增多并不能增加分区的下网极限。

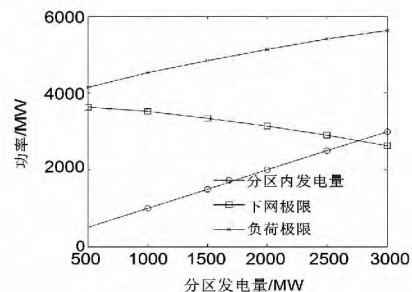


图 5 分区受电极限分析

3 分区受限方式分析

分区受电极限同时受到变压器容量制约, 分区电网负荷由 500 kV 主变压器和接入 220 kV 分区电网的地方电源共同供电。分区电网受电极限取决于 500 kV 变电站的配置情况、分区电网的电源容量、分区电网结构。假设同一变电站只配置同类型的变压器, 分区受电极限考虑 500 kV 主变压器 $N-1$ 后其余主变压器过载 30% 情况, 则受变压器容量制约下的受电极限为

$$P = 1.3 S_N \times (N - 1) \quad (9)$$

式中: S_N 为 500 kV 变压器容量; N 为分区主变压器台数。在不同的变压器台数下计算静态电压稳定极限, 与此台数下的热稳极限对比, 可以得出分区的受

电的受限方式; 考虑到不同线路长度、变压器容量、负荷功率因数和分区内部电源接入容量影响因数, 得到了不同网络结构下受限方式与变压器台数之间的关系。

3.1 线路长度对受电极限的影响

取变压器容量 1 200 MVA, 功率因数为 0.98, 考虑线路不同长度 10 km、20 km、30 km、40 km, 分区发电为 0, 根据上述公式计算出不同变压器台数下的热稳定极限和静态电压稳定极限, 结果如表 2 所示。

表 2 不同线路长度下热稳和静态电压稳定极限

变压器台数	热稳极限 /MW	电压稳定制约的下网极限 /MW			
		10 km	20 km	30 km	40 km
2	1 560	1 946	1 816	1 703	1 603
3	3 120	3 554	3 336	3 144	2 972
4	4 680	4 904	4 627	4 379	4 156
5	6 240	6 054	5 736	5 449	5 190
6	7 800	7 046	6 700	6 386	6 100
7	9 360	7 910	7 545	7 212	6 907

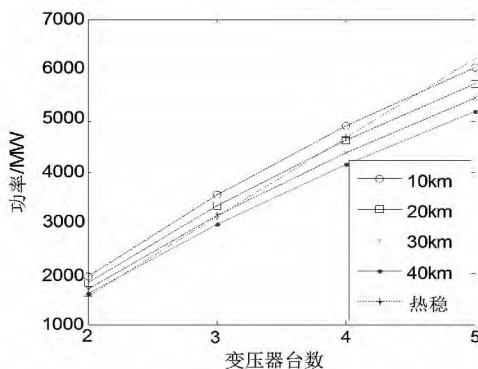


图 6 不同线路长度下的受电极限

由表 2 和图 6 可知, 变压器台数增加、线路变短, 等值阻抗都减少, 下网极限增加。当分区等值线路长度为 10 km 时, 分区变压器台数超过 4 台, 则分区受静态电压稳定限制。线路长度为 20 km 时, 分区变压器超过 3 台, 则分区受静态电压稳定限制。线路长度为 30 km 时, 分区变压器超过 3 台, 则分区受静态电压稳定限制。线路长度为 40 km 时, 分区变压器超过 2 台, 则分区受静态电压稳定限制。若考虑串联电抗器, 可在相应长度中减去。

3.2 变压器容量对受电极限的影响

取线路长度 20 km, 功率因数为 0.98, 考虑变压器容量 750 MVA、1 000 MVA、1 200 MVA, 分区发电量设为 0, 得到不同变压器容量下分区受限方式与变压器台数之间的关系。

表 3 750 MVA 下受限方式对比

变压器台数	热稳极限 /MW	下网极限 /MW
2	975	1 251
3	1 950	2 221
4	2 925	3 226
5	3 900	4 007
6	4 875	4 830
7	5 850	5 473

表 4 1 000 MVA 受限方式对比

变压器台数	热稳极限 /MW	下网极限 /MW
2	1 300	1 635
3	2 600	2 904
4	3 900	4 007
5	5 200	5 086
6	6 500	5 938
7	7 800	6 700

表 5 受限方式变化的临界变压器台数

变压器容量 /MVA	变压器台数
750	6
1 000	4
1 200	3

由表 3 ~ 表 5 可知, 随着变压器容量的增加, 出现静态电压稳定问题对应的变压器台数下降。变压器容量为 750 MVA 时, 变压器台数多于 6 台时, 分区受限方式为电压稳定。变压器容量为 1 000 MVA 时, 变压器台数多于 4 台时, 分区受限方式为电压稳定。容量为 1 200 MVA 时, 分区变压器台数多于 3 台时, 分区受限方式为电压稳定。

3.3 负荷功率因数对受电极限的影响

线路长度 20 km, 变压器容量为 1 200 MVA, 分别取负荷功率因数为 0.97、0.95、0.9 和 0.8, 分区发电量设为 0, 计算热稳极限和静态电压稳定极限, 结果如表 6 所示。图 7 为两种极限随变压器台数变化的对比图。

表 6 不同功率因数下热稳极限和静态电压稳定极限

变压器台数	热稳极限 /MW	电压稳定制约的下网极限 /MW			
		0.97	0.95	0.9	0.8
2	1 560	1 734	1 609	1 393	1 111
3	3 120	3 185	2 955	2 558	2 041
4	4 680	4 417	4 098	3 548	2 830
5	6 240	5 476	5 080	4 399	3 509
6	7 800	6 396	5 934	5 138	4 098
7	9 360	7 203	6 683	5 786	4 615

如图 7 可知, 功率因数为 0.97 时, 变压器超过 3 台, 则受限方式为电压稳定。当功率因数为 0.95 时,

变压器台数超过2台则存在电压稳定问题。当功率因数低于0.95时,则分区由静态电压稳定制约。

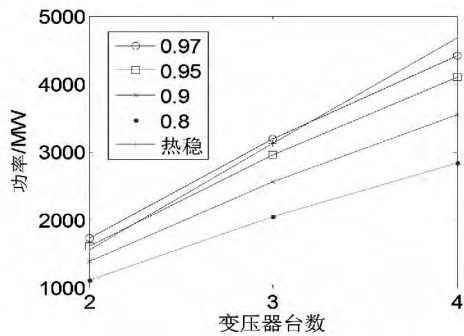


图7 不同功率因数下受限方式对比

3.4 分区内电源对受电极限的影响

一般分区内都存在电源以提供无功支撑,计算了分区电源不同接入容量下,分区的热稳极限和静态电压稳定极限。对比得出了分区内不同发电量下受限方式和变压器台数之间的规律,如表7所示。

表7 不同分区发电量下的热稳极限和电压极限对比

变压器台数	热稳极限 /MW	下网极限 /MW				
		500	1 000	1 500	2 000	2 500
2	1 560	2 397	2 847	3 139	3 592	4 045
3	3 120	3 930	4 382	4 688	5 140	5 591
4	4 680	5 218	5 674	5 995	6 449	6 901
5	6 240	6 323	6 784	7 120	7 577	8 033
6	7 800	7 283	7 750	8 101	8 563	9 022
7	9 360	8 125	8 599	8 963	9 431	9 896
8	10 920	8 870	9 352	9 728	10 202	10 673

表8 受限方式变化的临界变压器台数

分区电源(S_g)	变压器台数
0	4
500	5
1 000	6
1 500	6
2 000	7
2 500	7

注:变压器容量1 200 MVA

表8为受限方式变化的临界变压器台数。从表8可知,分区电源增加可以改善由静态电压稳定导致受电限制问题。此外,对于目前的受端电网负荷不断增加,同时迫于环境的压力需要减少分区内发电,则相应也需调整降低分区变压器台数,避免出现电压稳定问题。

4 结论

对典型受端电网分区进行了建模,从理论上分析网络结构对分区静态电压稳定性的影响;在此基础上分析其与热稳定之间的关系,从而得出了分区

电网受限方式与变压器台数之间的变化规律:变压器台数较低时分区受电受热稳制约,台数较高时受静态电压稳定制约,对于不同的分区情况,对应的变压器临界台数不同。针对北京电网各分区发电量0~2 500 MW情况,确定其分区受限方式变化对应的变压器台数在4~7台之间,高于上述台数分区受电极限受静态电压稳定制约,低于上述台数分区受电极限则由变压器热稳定制约。针对具有不同结构特性的电网,上述变压器台数略有变化,应视具体情况而定,但分析方法仍然适用。

参考文献

- [1] 马世英, 印永华, 李柏青, 等. 我国互联电网电压稳定评价标准框架探讨[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 7-13.
- [2] 董宸, 周霞, 李威, 等. 提升特高压电网输电能力的方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 1-4.
- [3] 李建华. 含HVDC和FACTS元件的复杂电力系统小干扰稳定性分析方法[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [4] CIGRE Task Force 38.02.10. Modelling of Voltage Collapse Including Dynamics Phenomena [R]. CIGRE Brochure No. 75, 1993.
- [5] Canizare C. Voltage Stability Assessment: Concepts, Practices and Tools [R]. [S]. I: IEEE/PES Power Systems Stability Subcommittee Special Publication, SP101PSS, 2002.
- [6] Abed A M. WSCC Voltage Stability Criteria Undervoltage Load Shedding Strategy and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology [C]. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999(1): 191-197.
- [7] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Voltage Stability of Power Systems: Concepts, Analytical Tools, and Industry Experience [M]. IEEE/PES 90TH0358-2-PWR, 1990.
- [8] Kundur P, Paserba J, Ajarapu V, et al. Definition and Classification of Power System Stability IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definitions [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 387-1401.
- [9] 周双喜, 朱凌志, 郭锡玖, 等. 电力系统电压稳定性及其控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [10] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 电网结构对短路电流水平及受电极限的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 62-67.
- [11] 王利锋, 李建华, 余颖辉. 分区电网电压稳定性研究[J]. 华东电力, 2010, 38(6): 0853-0857.

(收稿日期: 2015-12-08)