

基于 ESA 的风电场并网系统静态电压稳定性分析

张建平^{1,2}, 丁权飞¹

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 上海交通大学, 上海 200240)

摘要: 以特征结构分析法 (ESA) 为理论基础, 探讨了基于异步风力发电机组的风电场接入系统后对系统电压稳定性的影响。采用最小模特征值和参与因子作为衡量指标, 给出了系统的静态稳定裕度, 指出了系统中最有可能会发生电压不稳定的节点和区域。通过将风电场接入标准 IEEE39 节点测试系统并进行计算和分析, 结果表明: 风电场及其附近节点具有较强的参与特性, 是影响系统电压稳定的关键区域; 风电场接入后系统的静态稳定裕度降低, 弱稳定区域扩大, 在风力发电机机端装设补偿装置可以有效地改善系统的静态稳定裕度; 风电场的接入降低了系统的负荷裕度, 但是对系统达到极限负荷时的失稳区和失稳模式没有明显影响。

关键词: 风电场; 静态电压稳定性; 特征结构分析; 静态稳定裕度

Analysis of static voltage stability of grid-connected wind farm system based on ESA

ZHANG Jian-ping^{1,2}, DING Quan-fei¹

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: On the basis of eigenvalue structure analysis method (ESA), the impact of integration of wind farm equipped with induction generator on the static voltage stability of power systems is studied. Taking the minimum module eigenvalues and the participation factors as indicators, the static stability margin is clearly provided, as well as the most unstable node and region of the whole power system. A standard IEEE test system with 10 machines and 39 nodes including wind farm is applied for calculation and analysis. The results show that the wind farm and its associated nodes have strong participation features, and they are the critical region which affects the system voltage stability; that the integration of wind farm reduces the static stability margin and extends the weak stability region, and the installation of compensators in the terminal of wind turbine generator system can effectively improve the system's static stability margin; and that the integration of wind farm reduces the system's load margin, but it has no significant effects on the instability region and instability mode while the system reaches to its limit load.

Key words: wind farm; static voltage stability; eigenvalue structure analysis; static stability margin

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)21-0033-06

0 引言

风能是最具有开发利用前景的可再生能源之一, 具有清洁、可再生、不污染环境的优点, 目前已成为世界各国争相发展的新能源。如今, 风力发电正逐步走向规模化和产业化, 单个风力发电机组的容量正在不断增大, 风力发电在电网中所占的比例也越来越大。然而风力发电是一种特殊的发电形

式, 具有许多不同于常规能源发电厂的特点, 如风能的随机性和间隙性、基于异步风力发电机组的风电场在输出有功功率的同时还需要吸收无功功率、风电场一般都远离主电力系统与负荷中心等^[1]。基于以上这些特性, 加上风电场容量不断增加, 风电场并网对电力系统电压稳定性的影响也越来越显著, 因此研究风电并网系统中存在的电压稳定问题具有十分重要的意义。

关于风电场并网系统的静态电压稳定性问题, 目前的研究方法主要有 P-V 曲线法、V-Q 曲线法, 灵敏度分析法等等, 其中的 P-V 曲线法应用较多。张锋等^[2]绘制了不同控制策略下风电场接入点的 P-V 曲线, 并对不同控制策略下风电场的最大接入

基金项目: 上海市教委重点学科项目 (第五期) G51304; 上海市教育委员会科研创新项目资助 (11ZZ172, 11ZZ171); 上海市自然科学基金项目 (09ZR1413000); 上海市教委第三期本科教育高地建设项目资助

容量进行了分析。李作红等^[3]运用 P-V 曲线法, 计算得到了风电场并网系统的静态电压稳定极限, 分析了影响风电场静态电压稳定极限的主要因素。然而实际系统中电压稳定与否是与整个系统的运行模式密切相关的, 也就是说电压不稳定并不是发生在一个特殊的节点, 而是包含了电力系统中所有不同元件的参与。

特征结构分析法可以用来提供整个电力系统电压失稳的机理性信息、提供电力系统中不同元件的参与程度、确定系统的电压薄弱区域和关键节点, 同时该方法物理概念清晰、计算过程简单快速^[4-5]。席勇健等^[6]运用特征结构分析法, 确定了大规模电力系统的静态电压稳定裕度、弱稳定区和失稳区。吴强等^[7]运用特征结构分析法对交直流电力系统的电压稳定性进行了研究, 得到了交直流系统的电压稳定边界值, 并给出了最容易导致电压失稳的区域。目前所见文献, 有关采用特征结构分析法研究风电系统静态电压稳定性的报道还并不多见。马幼捷^[8]等采用特征结构分析法研究了风电系统的静态电压稳定性问题, 揭示了电压不稳定的机理和失稳模式, 并提供了相关节点的参与程度和稳定裕度信息。然而在处理风电场节点时仅仅将其视为一个简单的 PQ 节点加入到潮流计算程序中, 没有充分反映风力发电机组的特性, 分析结果存在较大误差。

鉴于此, 本文对风电场所在节点进行一定的处理, 在计及风力发电机组特性的基础上, 运用特征结构分析法对风电系统静态电压稳定性问题进行了研究, 较准确地反映了风电场的功率电压特性, 为风电场的规划和安全稳定运行提供合理的参考依据。

1 特征结构分析理论

1.1 系统雅可比矩阵的特征结构分析

假设所研究的系统共有 N 个节点, 其中 N_Q 个 PQ 节点、 N_V 个 PV 节点和一个平衡节点, 则极坐标下的潮流方程为^[4]:

$$\begin{cases} P_{Gi} - P_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ (i=1, 2, \dots, N-1) \\ Q_{Gi} - Q_{Li} = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \\ (i=1, 2, \dots, N_Q) \end{cases} \quad (1)$$

式中: $P_{Gi} - P_{Li}$ 和 $Q_{Gi} - Q_{Li}$ 分别是为注入节点的有功功率和无功功率; G_{ij} 和 B_{ij} 分别是导纳矩阵元素 Y_{ij} 的实部和虚部; U_i 和 θ_i 是相应节点的电压和相角。式 (1) 线性化的潮流方程可表示为式 (2)。

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\theta} & J_{PV} \\ J_{Q\theta} & J_{QU} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: ΔP 、 ΔQ 分别为节点有功、无功注入变化的列向量; ΔU 、 $\Delta \theta$ 分别为节点电压幅值、相角变化的列向量; J 为潮流偏微分形成的雅可比矩阵; $J_{P\theta}$ 、 J_{PV} 、 $J_{Q\theta}$ 、 J_{QU} 分别为 J 的子阵。

假设 $\Delta Y = [\Delta P \ \Delta Q]^T$, $\Delta X = [\Delta \theta \ \Delta U]^T$, 对 J 进行特征谱分解可以得到:

$$\Delta X = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{-1} u_i v_i^T \Delta Y = J^{-1} \Delta Y \quad (3)$$

式中: $J^{-1} = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{-1} u_i v_i^T$ 称为雅可比逆矩阵的谱分解; λ_i 为 J 的非零相异的特征值; u_i 、 v_i 为 J 的右、左特征向量。

由式 (3) 可知, 当雅可比矩阵存在一个零特征值时, 在这种情况下, 无论系统功率的摄动量多么小, 只要不为零, 都会引起系统节点电压的偏差量无限制漂移, 导致状态向量的偏差量趋于无穷大, 显然这就对应于系统静态稳定的极限情况。也就是说, 当系统的运行状况恶化时, 总会有一个特征值率先到达零值, 该特征值被称为最小模特征值, 记为 λ_{\min} , 因此可用 λ_{\min} 的大小来衡量系统在当前工作点的静态稳定裕度。

1.2 电压静态稳定的特征结构分析

分别用节点电压向量 $[\Delta \theta \ \Delta U]^T$ 和功率注入向量 $[\Delta P \ \Delta Q]^T$ 取代 ΔX 和 ΔY , 从而得到:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \lambda_i^{-1} u_i v_i^T \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (4)$$

假设系统的有功功率保持不变, 仅在第 k 个节点注入单位无功, 即取 $\Delta P = 0$, $\Delta Q = e_k$, 其中 e_k 是第 k 个元素为 1、其余元素均为 0 的单位列向量。由式 (4) 可以推导出, 此时所引起的系统状态变量的变化为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta U \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n \frac{u_i}{\lambda_i} v_{N-1+k,i} \quad (5)$$

式 (5) 中, $v_{N-1+k,i}$ 是左特征向量 v_i 的第 $N-1+k$ 个元素。故第 k 个节点的电压灵敏度为

$$\frac{dU_k}{dQ_k} = \sum_{i=1}^n u_{N+k-1} v_{N+k-1} = \sum_{i=1}^n \frac{P_{N+k-1}}{\lambda_i} \quad (6)$$

由式 (6) 可定义参与因子 $P_{ki} = u_{ki} v_{ki}$ 。参与因子 P_{ki} 反映了第 i 个特征模式 λ_i 对第 k 个节点电压灵敏度 dU_k / dQ_k 的相对贡献大小。横向比较, P_{ki} 越大, 说明第 k 个节点的电压灵敏度主要由 λ_i 决定;

纵向比较, 比较同一特征模式 λ_i 对不同节点电压灵敏度的贡献, 可找出与特征模式 λ_i 强相关的节点。由此可见, 若系统以 λ_i 模式失稳, 则与 λ_i 模式强相关的节点即构成系统在该模式失稳时的失稳区; 若最小模特征值 $\lambda_i > 0$, 则与其强相关的节点即构成全系统稳定性最差或者最容易发生不稳定的区域。

2 风电场并网系统电压稳定的特征结构分析

2.1 风电场的处理方式

假设所有风力发电机组均接于同一母线, 且均具有相同的机端电压, 忽略风电场内部线路损耗和变压器损耗, 同时还假设风电机组的切入风速、切出风速均相同, 并且不考虑尾流效应和地形变化等因素的影响。根据异步发电机稳态等值电路, 注入电网的有功功率 P_e 可以表示为^[9-10]:

$$P_e = \frac{-U_s^2 r_r / s}{(r_r / s)^2 + x_k^2} \quad (7)$$

转差 s 与机端电压 U_s 及功率 P_e 的函数关系:

$$s = -\frac{U_s^2 r_r - \sqrt{U_s^4 r_r^2 - 4P_e^2 x_k^2 r_r^2}}{2P_e x_k^2} \quad (8)$$

无功功率 Q_e 与有功功率 P_e 之间的关系为:

$$Q_e = \frac{r_r^2 + x_k(x_k + x_m)s^2}{r_r x_m s} P_e \quad (9)$$

式 (7) ~ (9) 中: $x_k = x_s + x_r$, r_s 、 x_s 为定子电阻和定子电抗; r_r 、 x_r 为转子电阻和转子电抗; r_m 、 x_m 为励磁电阻和励磁电抗。

异步发电机向系统注入有功功率的同时还要从系统吸收一定的无功功率, 吸收无功功率的大小与机端电压、发出的有功功率以及滑差密切相关, 所以风电场所在节点不能简单地处理为 PV 或者 PQ 节点。考虑到在潮流计算中每次迭代结束后节点电压得到修正, 而风电场的无功功率是有功功率和电压的函数, 因此本文中采用每次迭代结束修正后的电压对风电场无功功率进行校正, 然后再进行下一次迭代, 这样就能够潮流计算中充分计及风力发电机组的特性, 保证了计算精确度, 且不会额外增加迭代次数。

2.2 风电场并网系统电压稳定特征结构分析流程

通过计及风电场特性的潮流计算得到系统收敛潮流雅可比矩阵, 运用反幂法计算其最小模特征值 λ_{\min} , 然后计算出与 λ_{\min} 对应的左、右特征向量及与其强相关的主要节点, 关键支路和发电机即可满足系统分析的要求。风电场并网系统电压稳定的

特征结构分析法计算流程如图 1 所示。

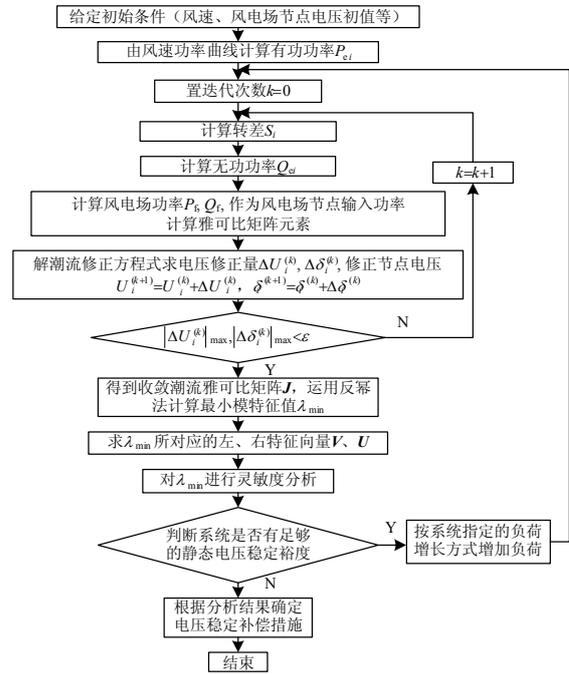


图 1 风电场并网系统电压稳定的特征结构分析流程图

Fig.1 Flowchart of eigenvalue structure analysis for voltage stability of grid-connected wind farm system

3 含风电场的电力系统算例分析

本文以 IEEE39 节点系统作为算例进行包含风电场的电力系统静态电压稳定分析, IEEE39 节点系统被认为是标准的用于稳定性研究的试验系统, 其系统参数见文献[4], 系统接线图如图 2 所示。为考

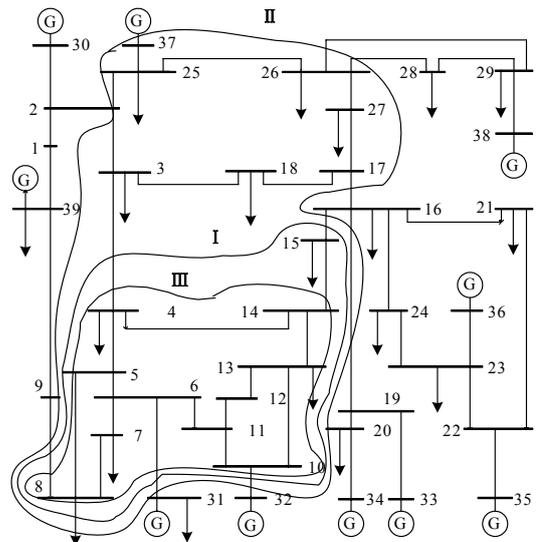


图 2 IEEE39 节点系统接线图

Fig.2 IEEE39 NODE power system

察风电场接入后对电力系统的影响以及风电场自身的静态电压稳定性, 现将 IEEE39 节点系统中第 37 号节点的 540 MW 常规发电机改为由 900 台额定容量为 600 kW 的风力发电机组成的风电场。

3.1 正常负荷下弱稳定区的计算分析

假设每台风力发电机都以额定出力运行, 考虑到 600 kW 风力发电机组的补偿容量一般都为 50~250 kvar, 故假设在本算例系统中其机端补偿容量为 200 kvar。在正常负荷情况下, 分别对标准的 IEEE39 节点系统和修改后包含风电场的 IEEE39 节点系统的节点参与因子进行计算, 定义相对节点参与因子为各节点参与因子与该模式下最大的一个节点参与因子的比值, 若节点的相对参与因子大于 0.4, 则认为该节点为影响系统稳定性的关键节点, 表 1 中给出了部分负荷节点的功率、电压以及最小模特征值对应的相对节点参与因子, 其中未给出节点的相对节点参与因子小于 0.4, 且表中大于 0.4 的相对节点参与因子用粗体数字表示。

表 1 正常负荷下分析结果
Tab.1 Analysis results with normal load

节点	负荷	标准 IEEE39 节点系统		接入风电场的 39 节点系统	
		电压	参与因子	电压	参与因子
3	3.220+j0.024	1.031	0.301 2	1.027	0.505 3
4	5.00+j1.84	1.004	0.581 9	1.003	0.629 8
5	0	1.006	0.574 3	1.005	0.543 4
6	0	1.008	0.537 7	1.007	0.500 9
7	2.338+j0.84	0.998	0.620 3	0.997	0.567
8	5.22+j1.766	0.998	0.598 6	0.997	0.547 8
10	0	1.018	0.5	1.017	0.463 2
11	0	1.013	0.566 3	1.012	0.52
12	0.085 3+j0.88	1.01	1	1.000	0.874
13	0	1.015	0.585 4	1.014	0.551 9
14	0	1.012	0.596 5	1.011	0.609 2
15	3.20+j1.53	1.016	0.403 8	1.015	0.473
17	0	1.034	0.317 3	1.032	0.487 2
18	1.58+j0.3	1.032	0.345 2	1.029	0.542
25	2.24+j0.472	1.058	0.064	1.049	0.487
26	1.39+j0.17	1.053	0.178 7	1.048	0.471
27	2.81+j0.755	1.038	0.283 3	1.035	0.561 8
37	0	1.028	—	1.016	1
最小模特征值 λ_{\min}		9.645 5		8.531 9	

由表 1 可知, 在正常负荷运行状况下, 接入风电场后的 39 节点系统各节点母线电压有不同程度的降低; 标准 IEEE39 节点系统的静态稳定裕度为 9.645 5, 而接入风电场后的 39 节点系统的静态稳定裕度为 8.531 9, 可见风电场接入后系统的静态稳定裕度有所降低; 根据表中给出的参与因子可见, 标准 IEEE39 节点系统的弱稳定区域由相对节点参与因子大于 0.4 的节点 4、5、6、7、8、10、11、12、13、14、15 组成, 在系统图中画出并用 I 表示, 而接入风电场后的 39 节点系统的弱稳定区域由节点 3、4、5、6、7、8、10、11、12、13、14、15、17、18、25、26、27、37 组成, 在系统图中画出并用 II 表示, 可见接入风电场后系统的弱稳定区域扩大, 风电场节点及其附近节点也包含在内, 风电场节点 37 的相对节点参与因子为 1, 表现出较强的参与特性, 可见它是影响系统静态电压稳定性的关键节点。

3.2 极限负荷下失稳区的计算分析

假设系统中平衡节点和 PV 节点的电压保持不变, 按同一比例均匀增加的方式增长所有负荷节点的功率, 负荷的增加量由平衡机来提供。由连续潮流法^[1]分别确定 IEEE39 节点系统和修改后包含风电场的 IEEE39 节点系统的临界运行点, 进而计算临界运行状况 (即最小模特征值为 0) 所对应的相对节点参与因子, 计算结果列于表 2。

表 2 临界运行状态分析结果
Tab.2 Analysis results with limit load

节点	标准 IEEE39 节点系统			接入风电场的 39 节点系统		
	负荷	电压	参与因子	负荷	电压	参与因子
4	6.399+j2.355	0.810	0.545 9	6.288+j2.314	0.806	0.560 4
5	0	0.768	0.946 9	0	0.768	0.946 1
6	0	0.767	1	0	0.767	0.996 3
7	2.992+j1.075	0.755	0.999 5	2.940+j1.056	0.756	0.994 6
8	6.681+j2.260	0.759	0.935 1	6.565+j2.221	0.761	0.930 6
10	0	0.849	0.415 5	0	0.849	0.414 8
11	0	0.819	0.584 2	0	0.819	0.582 1
12	0.109+j1.126	0.804	0.584 7	0.107+j1.106	0.804	0.579 9
13	0	0.841	0.436 9	0	0.840	0.437 7
14	0	0.838	0.416 0	0	0.836	0.423

由表 2 可以看出, 标准 IEEE39 节点系统和接入风电场后的 39 节点系统的电压失稳区是一致的, 在系统图 2 中画出并用 III 表示, 可见在 37 节点接入风电场后对系统的失稳区没有明显影响; 两种情况下系统的失稳方式也是相同的, 都是从 7、8 号节点开始失稳, 风电场接入后系统的失稳方式没有改变;

从表 2 中还可以看出,接入风电场后系统的极限负荷有所降低,低于标准 IEEE39 节点系统的极限负荷,因此,风电场接入后系统的负荷裕度降低。

3.3 风电场参与特性分析

图 3 给出了注入功率随着输入风速增加而增加的过程中,计算所得到的风电场接入节点及其附近节点的相对节点参与因子。由图 3 所示,随着注入功率的逐渐增加,风电场接入节点 37 的参与因子大幅增加并逐渐向 1 接近,该节点表现出较强的参与程度;风电场附近节点 25 和节点 27 的参与因子也逐渐增加到大于 0.4,这些节点逐渐成为影响系统电压稳定的关键节点。因此,随着风电场有功出力的增加,应当对风电场接入节点及其附近节点的电压稳定引起足够重视,针对性地采取一定的必要措施。

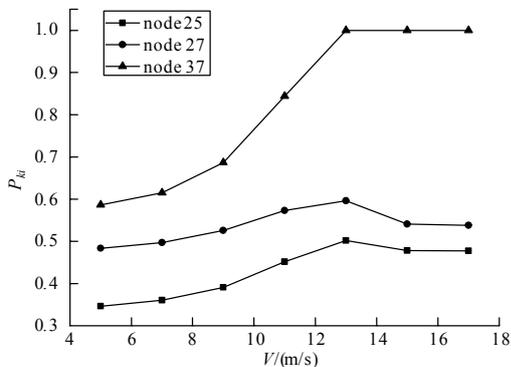


图 3 离散运行点的相对节点参与因子

Fig.3 Participation factors in scattered operation points

3.4 机端补偿对静态电压稳定裕度的影响

假设两种运行情况,分别是风力发电机机端不施加任何补偿和风力发电机机端施加 200 kvar 补偿容量,计算这两种情况下风速逐渐增加时系统的最小模特征值,即系统的静态稳定裕度,计算结果如图 4 所示。

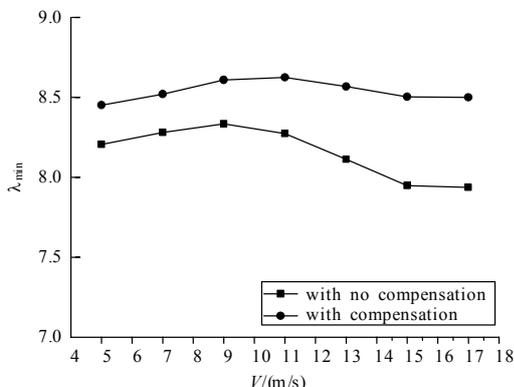


图 4 不同注入功率下系统的最小模特征值

Fig.4 System minimum module eigenvalues under different input power

由图 4 可以看出,在不同的输入风速下,机端有补偿时系统的稳定裕度都要大于机端无补偿时系统的稳定裕度,且在输入风速较大即风电场有功出力较大时,风力发电机机端施加补偿措施后系统稳定裕度提高的幅度更为明显。可见,在风电场节点施加一定的补偿措施能够有效改善风电场并网系统的静态电压稳定裕度。

4 结论

在潮流计算中对风电场节点进行一定的处理,采用根据风速确定有功,根据有功和电压确定无功的处理方式,这使得对收敛潮流雅可比矩阵的特征结构分析能够较准确地反映风电场的功率电压特性。

最小模特征值提供了系统的静态稳定裕度信息,风电场接入后系统的静态稳定裕度有所降低,系统的弱稳定区域扩大,弱稳定区域包括了风电场接入节点。

在风电场注入功率较高的运行情况下,风电场接入节点及其附近节点表现出较强的参与特性,它们是影响系统电压稳定的关键节点;对风电场接入节点施加补偿措施可以有效地提高系统的静态稳定裕度,且在风电场高注入功率的情况下,补偿措施对系统静态稳定裕度的改善作用更为明显。

风电场接入后对系统失稳区和失稳方式的影响不是很明显,但风电场接入后系统的负荷裕度降低,这就需要在系统的规划和运行中引起足够重视,必要时应当针对性地对特定母线采取一定的补偿或控制措施。

参考文献

- [1] 朱雪凌,张洋,高昆,等.风电场无功补偿问题的研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(16):68-76. ZHU Xue-ling, ZHANG Yang, GAO Kun, et al. Research on the compensation of reactive power for wind farms[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 68-76.
- [2] 张锋,晁勤,刘洪.不同控制策略下风电场接入地区电网的稳态分析[J].电网技术,2008,28(19):89-93. ZHANG Feng, CHAO Qin, LIU Hong. Steady-state analysis on switching-in regional power grid for wind farm adopting different control strategies[J]. Power System Technology, 2008, 28(19): 89-93.
- [3] 李作红,李建华,李常信,等.风电场静态电压稳定研究[J].电网与水力发电进展,2008,24(3):45-50. LI Zuo-hong, LI Jian-hua, LI Chang-xin, et al. Study on static voltage stability of wind farm[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2008, 24

- (3): 45-50.
- [4] 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.
ZHOU Shuang-xi, ZHU Ling-zhi, GUO Xi-jiu, et al. Power system voltage stability and its control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [5] 冯治鸿, 周双喜. 大规模电力系统电压失稳区的确定方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 152-156.
FENG Zhi-hong, ZHOU Shuang-xi. Determination of voltage collapse areas in large scale power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 152-156.
- [6] 席勇健, 郭永基, 颜寒, 等. 一种基于特征结构分析的电压稳定算法[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1998, 38(3): 1-5.
XI Yong-jian, GUO Yong-ji, YAN Han, et al. Algorithm for evaluating voltage stability based on eigenvalue structure analysis method[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 1998, 38(3): 1-5.
- [7] 吴强, 吴杰康, 梁纓, 等. 基于特征结构法的交直流系统电压稳定性分析方法[J]. 现代电力, 2007, 24(2): 1-7.
WU Qiang, WU Jie-kang, LIANG Ying, et al. Voltage stability analysis of HVAC/ DC systems based on eigenvalue method[J]. Modern Electric Power, 2007, 24(2): 1-7.
- [8] 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.
MA You-jie, ZHANG Ji-dong, ZHOU Xue-song, et al. Study on steady state voltage stability of power systems including wind farms based on eigen-structure analysis[J]. Electric Power, 2008, 41(3): 87-92.
- [9] Feijoo A E, Cidras J. Modeling of wind farms in the load flow analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(1): 110-115.
- [10] Saad S Z, Jenkins N. Models for predicting flicker induced by large wind turbines[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 743-748.
- [11] 徐晓春, 万秋兰, 顾伟, 等. 在线电压稳定分析中快速连续潮流的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(14): 37-41.
XU Xiao-chun, WAN Qiu-lan, GU Wei, et al. Application of fast continuation power flow for on-line voltage stability analysis[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(14): 37-41.

收稿日期: 2010-05-06

作者简介:

张建平(1972-), 男, 教授, 博士后, 从事风力发电及并网技术、新能源装置中关键部件性能仿真、寿命预测与可靠性测试等方面的研究。E-mail: jpzhanglzu@163.com

(上接第 32 页 continued from page 32)

- XU Bing-yin, LI Tian-you, XUE Yong-duan. Smart distribution grid and distribution automation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 38-42.
- [8] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.
WANG Cheng-shan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [9] 李永亮, 李刚. IEC61850第2版简介及其在智能电网中的应用展望[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 11-16.
LI Yong-liang, LI Gang. An introduction to 2nd edition of IEC61850 and prospects of its application in smart grid[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 11-16.
- [10] 尹项根, 汪响, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.
YIN Xiang-gen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [11] 林霞, 陆于平, 王联合. 分布式发电条件下的多电源故障区域定位新方法[J]. 电工技术学报, 2008, 23(11): 139-145, 165.
LIN Xia, LU Yu-ping, WANG Lian-he. New fault region location scheme in distribution system with DGs[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2008, 23(11): 139-145, 165.
- [12] 熊小伏, 陈星田, 夏莹, 等. 面向智能电网的继电保护系统重构[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 33-37.
XIONG Xiao-fu, CHEN Xing-tian, XIA Ying, et al. Study on reconstruction of relay protection system for smart grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(17): 33-37.

收稿日期: 2010-06-05

作者简介:

庞清乐(1969-), 男, 博士, 副教授, 在站博士后, 研究方向为智能配电网保护与控制;

高厚磊(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护、智能电网等; E-mail: houleig@sdu.edu.cn

杜强(1962-), 女, 高级工程师, 长期从事电力系统运行与管理工作。