

考虑电网特性的动态无功优化配置方法

黄小庆¹, 阮驰骋¹, 邹佳芯², 曹一家¹, 关维德¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 国网青海省电力公司电力科学研究院, 青海 西宁 810008)

摘要:提出一种考虑电网特性的、多准则动态无功优化配置方法。该方法在考虑电网拓扑结构和功率分布特性的基础上,以节点电压稳定的重要度指标,筛选出维持系统暂态电压稳定的重要节点;结合基于偏差量的节点电压稳定的薄弱度排序,快速确定补偿装置的候选安装点;利用改进轨迹灵敏度指标,分析补偿装置配置位置不同时,对多个关键故障的极限切除时间的提升效果和对全系统暂态电压稳定的改善效果的差异,选取最优安装点。最后,利用暂态电压稳定标准校验安装效果,确定最优容量,获得兼顾技术性与经济性的最优配置方案。所提方法通过 IEEE 39 节点算例进行了仿真验证。

关键词:暂态电压稳定;节点电压;薄弱度;重要度;改进轨迹灵敏度指标;动态无功优化;无功配置

中图分类号: TM 714.3

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.019

0 引言

电能需求的不断增加使电力系统的电压稳定问题备受关注。静止同步补偿器 STATCOM (Static synchronous COMPensator) 和静止无功补偿器 SVC (Static Var Compensator) 等动态无功补偿装置能在系统发生故障后快速提供动态电压支撑,提高系统的暂态电压稳定水平。

为充分发挥动态无功补偿装置的作用,必须选择合适的安装点和容量。目前,对安装点的研究多采用静态电压稳定的分析方法,如以提高功率裕度和电压稳定裕度^[1-2]为目标的方法、基于 $U-Q$ 曲线^[3]的方法、先导节点法^[4]和主导节点法^[5]等,或基于向量场正规形理论,根据非线性参与因子^[6]确定动态无功补偿装置的安装点,以提高系统的静态电压稳定性。上述方法选择安装点,既没有考虑感应电动机等快速响应设备的动态特性,也没有考虑全局补偿效果。文献[7-8]基于轨迹灵敏度指标 TSI (Trajectory Sensitivity Index),文献[9]以最大限度延长电网关键故障下的极限切除时间为目标,进行动态无功优化配置。上述方法完全依靠时域仿真计算,仿真场景的选择对其结果有一定的影响,而且配置方案只考虑了安装效果,并未考虑经济性问题。

相应地,动态无功优化配置方法得到研究,如基于阻抗模裕度指标 IMMI (Impedance Modulus Margin

Index)^[10]、采用静态负荷裕度分析法和动态仿真分析^[11]等方法,综合考虑了多种故障模式下的无功补偿装置的整体规划。特别地,兼顾配置效果和经济性的无功配置方法得到重视,如文献[12]提出了基于暂态电压严重性指标 TVSI (Transient Voltage Severity Index) 和多目标分解进化算法 MOEA/D (Multi-Objective Evolutionary Algorithm based on Decomposition) 的无功优化。文献[13]提出了一种可同时考虑静态与动态无功补偿的无功补偿优化模型,在此基础上通过动态仿真和静态分析相结合的方法迭代求解最优方法。

但是,目前的动态无功优化配置方法大多仅从某一特定的角度进行分析。分析角度不同,造成配置方案差别较大。考虑到各种方法之间并不对立,如果能利用不同方法的优势,动态地对无功优化配置问题进行全面分析,将减少计算量并提高配置装置效率。

基于此,本文提出了一种考虑电网特性的多准则动态无功优化配置方法。准则包括:节点电压稳定的重要度(下文简称重要度)、节点电压稳定的薄弱度(下文简称薄弱度)以及改进 TSI。其中,重要度指标可识别电网拓扑结构和功率特性对节点电压稳定的影响,明确需重点进行电压监测和保护;薄弱度指标可识别自身暂态电压较不稳定的节点;改进 TSI 可描述无功注入量对全系统暂态电压水平的实际提升效果。

各准则存在一定的内在联系,但各有侧重。本文利用不同准则的优势,多角度、全面地筛选对系统暂态电压稳定有重要影响且自身易出现暂态电压失稳的节点作为候选安装点;选择能兼顾全系统暂态电压稳定的节点作为最终安装点;并结合暂态电压稳定标准选取最优配置容量。

收稿日期:2015-07-28;修回日期:2016-07-21

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)项目(2012-AA050217);国家自然科学基金重点资助项目(61233008);国家自然科学基金面上项目(51577053)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (863 Program) (2012-AA050217), the Key Program of National Natural Science Foundation of China (61233008) and the General Program of National Natural Science Foundation of China (51577053)

1 动态无功优化配置的 3 个准则

1.1 节点电压稳定的重要度指标

重要度指标是指考虑电网拓扑结构影响时,维持各节点电压稳定的重要程度。电力系统是由大量的节点和节点之间的连线(边)组成的复杂网络。节点作为网络的核心元素,其连接方式影响着网络的拓扑结构、信息能量流通的效率和成本。而电力系统规模庞大,无法监视和调整每一个节点的电压,通常只能关注一些重要节点。

由于电压等级较高的节点在电网中起着输送和分配大容量功率的作用,这些节点一旦发生电压失稳故障,对电网的冲击将很大。以中枢节点为例,一旦其因电压失稳退出运行后,可能造成网络结构的大破坏,进而引起潮流转移或连锁性事故扰动,最终导致系统电压崩溃。需重点监测和保护这些节点电压。

本文利用重要度指标对维持各节点的电压稳定的重要程度进行量化评估。考虑到网络结构和节点注入功率均对节点电压稳定重要度指标存在影响,本文将节点的重要度定义为:

$$I_i = \eta_1 D_i + \eta_2 \bar{S}_i \quad (1)$$

其中, I_i 为节点 i 的电压稳定重要度; D_i 为节点 i 的度,表示直接与节点 i 相连的边的数量; η_1 、 η_2 为权重系数,且 $\eta_1 + \eta_2 = 1$; $\bar{S}_i$ 为节点 i 的功率特性,计算公式见式(2)。

$$\bar{S}_i = S_i / S_{\text{base}} \quad (2)$$

其中, S_i 为节点 i 的注入功率; S_{base} 为选定的系统基准功率。 $\bar{S}_i$ 反映了节点 i 在系统中传输和分配功率的重要程度,其值越大,说明此节点在系统中传输和分配的功率越多,一旦出现故障,影响就越大。

式(1)中, $\eta_1 D_i$ 反映节点的拓扑结构特性,它不受潮流分布的影响,其值越大,说明该节点退出运行后越有可能引起更多节点或线路的故障,系统维持拓扑结构完整和正常运行的能力越低,在系统中越重要; $\eta_2 \bar{S}_i$ 随着电网潮流分布的变化而变化,反映了节点的功率特性,其值越大,说明该节点越重要。

根据节点的拓扑结构特性与功率特性对系统暂态电压稳定性的相对影响,选取合适的 η_1 和 η_2 的值,由式(1)即可得到各节点的电压稳定的重要度 I_i 。

1.2 基于偏差量的电压薄弱度指标

灵敏度法具有物理概念简单明确、判据严格准确的优点^[14]。传统的灵敏度法判定系统电压稳定的判据如下^[15]:

(1) $dU_L/dQ_L < 0$, 当负荷节点无功需求 Q_L 减少(或增加)时,该节点电压 U_L 随之上升(或下降),此

时系统电压是稳定的;

(2) $dQ_L/dQ_g > 0$, 当负荷节点的无功需求 Q_L 增加(或减少)引起发电机无功输出 Q_g 的增加(或减少)时,系统电压是稳定的。

当时间足够短时,判据(1)和(2)可写为差分形式 $\Delta U_L/\Delta Q_L$ 和 $\Delta Q_L/\Delta Q_g$ 来判断电压稳定。负荷节点的有功和无功随负荷特性变化,但在短时间内变化不明显。因此,当负荷节点的负荷水平变化较小时,即使系统遭受大扰动或运行方式发生突变,负荷节点的无功的差分量变化也较小。相对应地,负荷节点的电压幅值却随系统扰动变化明显,且引起系统电压失稳的主要原因是系统无法维持无功功率的动态平衡和缺乏合适的电压支持^[16]。因此,利用发电机节点的无功功率以及负荷节点的电压幅值判断系统的电压稳定性更为合适。

定义基于偏差量的节点电压的薄弱度指标为:

$$U_{wi} = \frac{\sum_{j \in \Omega_L} \Delta Q_j}{\Delta U_i} \quad i \in \Omega_L \quad (3)$$

其中, Ω_L 为负荷节点的集合; Ω_G 为发电机节点的集合; ΔU_i 为负荷节点 i 的电压幅值变化量; ΔQ_j 为发电机节点 j 的无功功率变化量。

因此,仅需相邻时刻电压和无功功率的变化量即可计算式(3)定义的节点电压薄弱度指标。由判据(1)和(2)可知,当系统电压稳定时,负荷节点无功需求减少(或增加),其电压随之上升(或下降),同时引起发电机无功输出的减少(或增加)。即电压稳定的判据为:

$$U_{wi} < 0 \quad (4)$$

U_{wi} 越靠近 0, 表明无功功率对节点电压变化调节能力越弱,即节点的电压越薄弱。据此,依据各节点的电压薄弱度排序,可以辨识电压薄弱节点。为减少计算误差并避免仅凭一次判断可能出现的错判,以一段时间内的指标均值判断节点电压的薄弱度。将式(3)改写为:

$$\bar{U}_{wi} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^m U_{wi}(\lambda, \Delta t_i) \quad (5)$$

其中, $\bar{U}_{wi}$ 为单位时间内节点电压薄弱度指标的均值; $U_{wi}(\lambda, \Delta t_i)$ 为 Δt_i 内的指标值, Δt_i 为采样周期, λ 为 Δt_i 内与该指标计算相关的参数,包括各发电机节点的无功功率和负荷节点的电压; T 为采样总时间; $m = T/\Delta t_i$, 为时间 T 内的采样周期数。

1.3 改进 TSI

轨迹灵敏度可从侧面反映节点电压随无功功率实时变化的程度,适用于暂态稳定的分析与控制中。本文采用 TSI 确定对全系统暂态电压水平提升最明显的安装点。多机电力系统的动态行为通常可用如下微分代数方程表示:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = f(x, y, \lambda) \\ 0 = g(x, y, \lambda) \end{cases} \quad (6)$$

其中, f 为发电机及其励磁系统、负荷和动态无功补偿装置等的动态特性; g 为系统的潮流模型; x 和 y 分别为系统的状态变量(如发电机功角和角速度)和代数变量(如节点的电压和相角); λ 为系统参数, 本文表示节点注入的无功功率。式(6)对应的初值为:

$$\begin{cases} x(t_0) = x_0 \\ y(t_0) = y_0 \end{cases} \quad (7)$$

若将式(6)的解记为 $x(\lambda, t)$ 和 $y(\lambda, t)$, 对其按泰勒级数展开并忽略高阶项可得:

$$\begin{cases} \Delta x(\lambda, t) = \frac{\partial x(\lambda, t)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \triangleq x_\lambda(t) \Delta \lambda \\ \Delta y(\lambda, t) = \frac{\partial y(\lambda, t)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \triangleq y_\lambda(t) \Delta \lambda \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} x_\lambda(t) \approx \frac{\Delta x(\lambda, t)}{\Delta \lambda} = \frac{x(\lambda + \Delta \lambda, t) - x(\lambda, t)}{\Delta \lambda} \\ y_\lambda(t) \approx \frac{\Delta y(\lambda, t)}{\Delta \lambda} = \frac{y(\lambda + \Delta \lambda, t) - y(\lambda, t)}{\Delta \lambda} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $x_\lambda(t)$ 和 $y_\lambda(t)$ 分别为变量 x, y 对参数 λ 的轨迹灵敏度。当 $\Delta \lambda$ 足够小时, 可用式(9)近似计算轨迹灵敏度 $x_\lambda(t)$ 和 $y_\lambda(t)$ 。

文献[7]将 TSI 定义为:

$$I_{TSI} = \sum_{j=1}^n \left[\sum_{k=1}^{N_k} \left(\frac{\partial U_j}{\partial Q_i} \right)_{t=t_k} \right] \quad (10)$$

其中, $i, j (i, j=1, 2, \dots, n)$ 为节点编号, n 为系统的节点总数; $t_k (k=1, 2, \dots, N_k)$ 为第 k 个采样时刻, N_k 为采样时间点总数; U_j 为节点 j 的电压; Q_i 为节点 i 注入系统的无功功率; $(\partial U_j / \partial Q_i)_{t=t_k}$ 为 $t=t_k$ 时 U_j 关于 Q_i 的轨迹灵敏度值。

文献[7]采用式(9)的方法近似计算轨迹灵敏度, 即从故障发生时刻向节点 i 直接注入恒定的无功功率 Q , 取有、无注入 Q 时电压 U_j 在 $t=t_k$ 时的差值除以 Q 得到 $(\partial U_j / \partial Q_i)_{t=t_k}$ 。文献[8]在考虑动态无功补偿装置实际特性的基础上, 取有、无在节点 i 安装额定容量为 Q 的动态无功补偿装置下, 电压 U_j 在 $t=t_k$ 时的差值除以 Q 得到 $(\partial U_j / \partial Q_i)_{t=t_k}$, 结果更准确, 但计算时无功功率的增量仍为恒定值, 与真实的轨迹跟踪过程存在误差, 无法准确体现实电压支撑效果。

事实上, 动态无功补偿装置注入系统的无功功率随安装点电压的变化而变化, 并不能维持恒定。因此本文采用动态无功补偿装置的实时、实际无功注入计算 TSI, 该无功功率可由 $Q-t$ 曲线得出。安装前不存在补偿装置注入的无功功率, 即 $Q-t$ 曲线面积为 0。安装后, $Q-t$ 曲线的面积即可反映补偿装置实际注入系统的无功功率。根据定积分的定义, 将 TSI 的求解转化为对各节点 $U-t$ 曲线和安装点 $Q-t$ 曲

线在相同时间内多个采样时间点数据的处理。本文基于文献[7]和文献[8]对 TSI 改进如下:

$$I_{TSI} = \sum_{k=1}^{N_k} \frac{\sum_{j=1}^n [U_j(t_k, Q_{i0} + \Delta Q_i(t_k)) - U_j(t_k, Q_{i0})]}{\Delta Q_i(t_k)} \quad (11)$$

其中, $U_j(t_k, Q_{i0})$ 为故障后 $t=t_k (k=1, 2, \dots, N_k)$ 时节点 j 的电压, 此时节点 i 注入系统的无功功率为 Q_{i0} ; $\Delta Q_i(t_k)$ 为节点 i 安装动态无功补偿装置后在 $t=t_k$ 时注入系统的无功功率增量, 随时间不断变化。

本文所做改进使 TSI 的计算方法更符合其物理意义, 理论上可更准确地反映各候选点安装动态无功补偿装置对全系统暂态电压水平的提升效果, 计算结果更准确。

2 多准则动态无功优化配置方法

由于电网的本质特性对其性能有深刻的影响, 电网的拓扑结构和功率特性决定了系统中存在关系电压稳定性的重要节点。这些节点因电压稳定问题退出运行后将造成系统结构的大破坏, 进而引起潮流转移或连锁性事故, 使系统维持正常运行的能力大幅降低, 造成更大规模的电压稳定问题。尽管维持这些节点的电压稳定较其他节点更为重要, 但其实际运行电压可能处于相对稳定的状态。另一方面, 电压薄弱度指标只能反映该节点的运行状态, 不能反映在该节点安装动态无功补偿装置对全系统暂态电压稳定水平的提升效果。因此, 可采用多准则的方法兼顾不同影响因素, 选择最优安装点。

极限切除时间表示切除故障的极限允许时间, 可反映系统的暂态电压稳定水平。不同动态无功配置方案对于关键故障的极限切除时间会有不同程度的提高^[17]。因此, 本文通过比较不同配置方式对多个关键故障极限切除时间的提升效果, 确定最佳配置位置, 并以满足暂态电压稳定标准的最小容量作为兼顾技术性能与经济性的最优容量, 进而确定最优配置方案。具体步骤如下。

a. 由式(1)计算各节点电压稳定重要度指标并排序, 指标值较大者对维持系统电压稳定更为重要。

b. 通过时域扫描确定威胁系统暂态电压稳定的关键故障, 并对关键故障进行时域仿真。由式(3)和式(5)计算各节点在不同时段 T 内的电压薄弱度指标并排序, 统计各节点电压薄弱程度在各时段排名靠前的次数, 次数较多的节点电压较薄弱。

c. 筛选出在电压稳定重要度指标排序靠前的节点和在电压薄弱度指标排序中靠前的节点作为候选安装点集。

d. 依次在各候选安装点安装动态无功补偿装置, 再次对关键故障进行时域仿真。由式(11)计算

各候选安装点的改进 TSI 并排序,指标值最大者为最优安装点。

e. 考虑实际安装容量的限制,选取一定的动态无功容量,按平均和步骤 d 的排序等方式(改进 TSI 越大,分配的容量越多),集中或分散地给各安装点分配动态无功补偿容量。比较不同配置方式对多个关键故障后极限切除时间的延长值,确定对系统暂态电压稳定性提升效果最好的配置方式。

f. 针对步骤 e 得出的动态无功补偿的位置和容量,利用系统暂态电压稳定标准对安装效果进行校核。选取满足要求所需的最小容量作为最优容量,从而确定最优配置方案。

3 算例分析

本文以 IEEE 39 节点系统和 STATCOM 为例,说明上述动态无功优化配置方法实施的具体步骤。

3.1 节点电压稳定的重要度指标的计算与分析

IEEE 39 节点系统的拓扑结构如图 1 所示。取 $\eta_1=\eta_2=0.5, S_{base}=100\text{ MV}\cdot\text{A}$, 节点的视在功率参考新英格兰 10 机 39 节点标准测试系统数据,计算 IEEE 39 节点系统各节点的电压稳定的重要度。重要度由大到小的顺序排序,如表 1 所示。

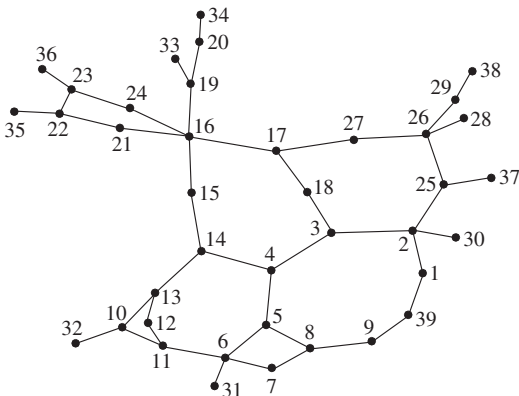


图 1 IEEE 39 节点系统拓扑结构图
Fig.1 Topology of IEEE 39-bus system

表 1 节点电压稳定重要度排序
Table 1 Nodes reordered according to voltage stability importance index

排序	度	重要度	节点编号	排序	度	重要度	节点编号
1	1	6.160	39	10	1	3.200	34、37
2	1	4.650	38	11	3	3.110	3
3	3	4.255	8	12	2	2.775	15
4	2	4.180	20	13	3	2.735	23
5	3	4.165	4	14	4	2.700	26
6	5	4.155	16	15	3	2.645	25
7	1	3.750	32、35	16	2	2.605	24
8	1	3.660	33	17	2	2.485	21
9	1	3.300	36				

由表 1 可知:

(1)节点 38、39 的电压稳定重要度都很大,但由

于它们是 PV 节点,电压幅值恒定,故不考虑其作为候选安装节点;

(2)节点 8 的电压稳定重要度在 PQ 节点中是最大的,说明它的电压一旦失稳,可能引起连锁性事故扰动,甚至导致整个系统崩溃,需要重点关注;

(3)节点度数和电压稳定重要度的排序并不完全一致,因为电压稳定重要度指标不仅与电网的拓扑结构有关,还与其功率特性有关。

3.2 节点电压稳定的薄弱度指标的计算与分析

对系统进行时域扫描后发现线路 16-17 的三相永久性故障是可能引起全系统暂态电压失稳的关键故障。因此本算例的时域仿真均在 $t=1\text{ s}$ 时线路 16-17 发生三相永久性故障,故障持续时间为 0.1 s,采样时间间隔为 0.01 s,各节点负荷水平保持不变的条件下进行。

采用 30% 感应电动机负荷+70% 恒阻抗负荷进行时域仿真。取式(5)中的 $T=0.1\text{ s}$,在 1.0~2.5 s 内选取负荷节点的电压和发电机节点的无功功率各 150 个采样时间点的值,由式(3)和式(5)计算各节点的电压薄弱度指标。统计各负荷节点在各时段指标值排序前 10 名的次数,并按电压薄弱度由高到低的顺序排序,如表 2 所示。

表 2 故障下各节点电压薄弱度排序
Table 2 Nodes reordered according to voltage stability weakness index for specified contingency

排序	次数	节点编号	排序	次数	节点编号
1	13	15	6	5	4
2	11	13、14	7	4	21、26、27
3	10	8、11	8	2	2、22、23
4	8	6、16、19、28、29	9	1	3、17
5	7	5、10、12、20	10	0	1、7、9、18、24、25

由表 2 可知:

(1)节点 13、14、15 的电压薄弱度指标排名前 10 的次数较多,说明当系统出现扰动时,这些节点相对于其他节点而言更容易出现暂态电压稳定问题;

(2)综合表 1 和表 2 的排序结果可知,表 1 中部分电压稳定重要度未达到平均值的 PQ 节点(节点 1、2、9、10、17、18、22),在表 2 中排名也靠后,反映了电网本质特性与其性能的联系;

(3)把表 1 排序前 10 的 PQ 节点和表 2 排序前 10 的节点作为候选安装点集,计算其改进 TSI。

3.3 改进 TSI 的计算与分析

采用 30% 感应电动机负荷+70% 恒阻抗负荷进行时域仿真,计算候选安装点的改进 TSI。首先验证本文对 TSI 所做改进的有效性。文献[8]已验证采用其改进 TSI 确定安装点比文献[7]中传统的 TSI 更准确。因此本文在 STATCOM 容量同为 100 Mvar 和

仿真条件相同的情况下,针对 IEEE 39 节点算例对文献[8]和本文的 TSI 排序结果进行对比。本文改进 TSI 排名前 10 的节点依次为 19、20、16、22、23、21、15、14、13、11;文献[8]的 TSI 排名前 10 的节点依次为 19、16、22、21、23、15、20、14、13、10。

文献[8]与本文的排序结果相比,2 种方法得出的最优安装点均是节点 19,说明节点 19 确为对系统暂态电压水平提升效果最好的安装点。两者排序结果并不完全相同。当系统负荷为 50% 感应电动机负荷+50% 恒阻抗负荷时,在 2 种方法的 TSI 排序靠前的节点安装 100 Mvar 的 STATCOM,考察在不同节点安装动态无功补偿装置后,电压最薄弱的节点 15 在故障后的电压恢复情况如图 2 所示(U 为标么值)。

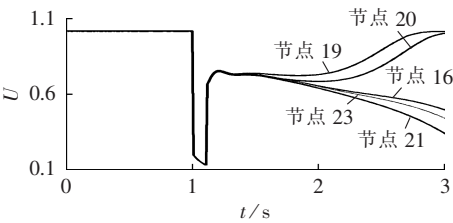


图 2 节点 15 故障下的电压-时间曲线
Fig.2 Voltage-time curve for specified contingency of node 15

由图 2 可知,分别在节点 19 和在文献[8]中排名第 7 的节点 20 安装 STATCOM 均能使节点 15 的电压最终恢复稳定,安装效果优于节点 16、21、23。图 2 所示结果与本文的排序完全相符,证明本文的改进 TSI 能更真实地反映实际轨迹跟踪,计算结果更准确。

为确定最优安装点,利用各节点的 $U-t$ 曲线和 STATCOM 注入系统的实际无功功率的 $Q-t$ 曲线在 1.1~2.6 s 内 150 个采样时间点的值,由式(11)计算候选安装点的改进 TSI,按由高到低的顺序排序于表 3。

表 3 改进 TSI 排序
Table 3 Nodes reordered according to improved TSI

排序	改进轨迹灵敏度/ ($\text{kV}\cdot\text{Mvar}^{-1}$)	节点 编号	排序	改进轨迹灵敏度/ ($\text{kV}\cdot\text{Mvar}^{-1}$)	节点 编号
1	1.099 658	19	6	0.606 237	11
2	0.902 257	16	7	0.601 556	6
3	0.840 867	15	8	0.516 086	8
4	0.800 693	14	9	0.426 785	29
5	0.633 874	13			

为研究动态无功补偿装置的容量对改进 TSI 排序结果的影响,本文分别在各候选安装点安装容量为 50 Mvar、100 Mvar 和 150 Mvar 的 STATCOM,计算各节点的改进 TSI,结果如图 3 所示。由图 3 可知,不同安装容量下各节点的排序总体上是一致的,这

是由于单个动态无功补偿装置的容量相对于实际系统的装机容量是很小的,安装容量的选择一般不会影响各节点改进 TSI 的排序结果。

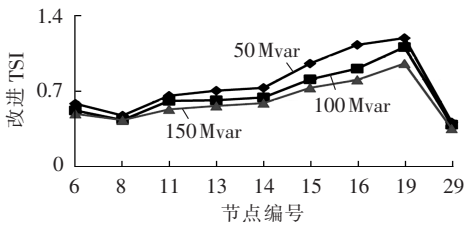


图 3 不同 STATCOM 容量下各节点的改进 TSI
Fig.3 Improved TSI of different nodes for different STATCOM capacities

3.4 动态无功最优配置方案的确定

设单台 STATCOM 的最大容量为 100 Mvar。为进一步研究不同配置方式对系统暂态电压稳定性的提升效果,由表 3 的排序结果制定了 6 种不同的配置方案,如表 4 所示。其中,第 7 种配置方案为后文中求出的最优配置方案。各方案负荷均为 50% 感应电动机负荷+50% 恒阻抗负荷,各节点所配置的容量比例与表 3 中节点的排序对应。各方案在线路发生三相永久性故障后极限切除时间的延长值如表 5 所示。

表 4 7 种配置方案
Table 4 Seven configuration schemes

方案编号	安装节点	安装容量/Mvar
1	19	100
2	19、16、15、14	100×4
3	19、16、15、14	50×4
4	19、16、15、14	80、60、40、20
5	19、16、15、14、 13、11、6、8	50×8
6	19、16、15、14、 13、11、6、8	100、80、60、50、 40、30、25、15
7	19、16、15、14	48、36、24、12

表 5 不同方案的动态无功配置效果
Table 5 Effect of dynamic var configuration for different schemes

故障 线路	极限切除时间延长值/s						
	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7
16-15	0.02	0.04	0.02	0.03	0.03	0.04	0.03
16-17	0.02	0.05	0.03	0.03	0.03	0.04	0.03
16-21	0.01	0.04	0.02	0.02	0.03	0.04	0.02
16-24	0.01	0.04	0.02	0.03	0.03	0.03	0.02
17-27	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.02
总延长值/s	0.07	0.19	0.10	0.13	0.14	0.19	0.12

由表 5 可知,仅在单个节点安装 STATCOM 对系统的暂态电压稳定性的提升效果有限,应分散安装在多个节点。增加 STATCOM 的安装容量有助于提升系统的暂态电压稳定性。比较方案 2、5 可知,在总安装容量相同的情况下,选取少数几个改进 TSI 排名靠前的候选点安装 STATCOM 的效果优于在更多

节点分散安装,且设备的投资和管理费用较少。比较方案 3、4 或方案 5、6 可知,根据改进 TSI 的排序,按一定比例分配各点的安装容量比平均分配对系统暂态电压稳定性的提升更明显。综上,在节点 19、16、15、14 按其改进 TSI 排序分配 STATCOM 的安装容量的配置方式效果最佳。按照三相永久性故障 0.1 s 切除,故障清除后 1 s 时负荷母线电压恢复到 0.75 p.u. 以上的暂态电压稳定标准^[15]校核,得出最优配置方案 7:节点 19 为 48 Mvar,节点 16 为 36 Mvar,节点 15 为 24 Mvar,节点 14 为 12 Mvar。

3.5 配置方案经济性分析

STATCOM 较其他无功补偿装置有着优越的性能,但同时其高昂的成本也是限制其发展的重要因素。因此,关于配置方案的投资经济性考虑也就成为了一个重要的方面。选取 7 种配置方案进行经济性对比,对比结果如表 6 所示。其中,总的经济成本分为安装成本和设备购买成本^[18],设备购买成本约为 32 万元/Mvar^[19],安装成本每个节点 30 万元。

表 6 不同方案的经济性比较

Table 6 Comparison of costs among different schemes

方案 编号	安装节点 数/个	安装容量/ Mvar	安装成本/ 万元	购买成本/ 万元	总成本/ 万元
1	1	100	30	3200	3230
2	4	400	120	12800	12920
3	4	200	120	6400	6520
4	4	200	120	6400	6520
5	8	400	240	12800	13040
6	8	400	240	12800	13040
7	4	120	120	3840	3960

由表 6 可知,7 种方案中成本投入最少的为方案 1,其总成本为 3230 万元,但是由表 5 可知,方案 1 的总延长值仅为 0.07 s,其暂态电压稳定性的提升效果有限;而方案 7 的总成本为 3960 万元,略高于方案 1,远低于其他几种配置方案,但它对暂态电压稳定性的提升约为 0.12 s,比方案 1 要高得多,故方案 7 比方案 1 更优。方案 2—6 的成本均远大于方案 7,但是对暂态电压稳定性的提升效果并不理想,其资金投入和提升效果不成比例,故相比之下方案 7 较优。

4 结语

本文从维持整个系统电压稳定的角度,从对维持系统电压稳定重要且自身电压稳定相对薄弱的节点中,选择动态无功优化装置的配置候选点。利用改进的 TSI 排序,描述候选节点对系统暂态电压稳定性提升效果,进一步筛选出安装节点。结合考虑电力系统暂态电压稳定标准和经济性约束,得出补偿装置的最佳配置位置和具体配置容量。

本文的多准则配置方法,既考虑了系统拓扑结

构和功率特性对无功补偿效果的影响,又考虑了节点电压本身的薄弱程度,兼顾了单位无功补偿对系统暂态电压稳定的调节效率。该方法同时考虑了系统的静态物理特性和节点、系统的动态运行状态,顾及注入动态无功对全系统暂态电压稳定的影响,以及电力系统相关标准和经济性的约束,为动态无功配置装置的选点和定容,提供了有别于“基于单一准则选点”的新思路。

参考文献:

- [1] 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.
LIU Chuanquan,ZHANG Yan. Confirmation of reactive power compensation node and its optimal compensation capacity[J]. Power System Technology,2007,31(12):78-81.
- [2] POURBEIK P,KOESSLER R,QUAINTANCE N,et al. Performing comprehensive voltage stability studies for the determination of optimal location,size and type of reactive compensation[C]//Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exposition. Atlanta,GA,USA:IEEE,2006:118.
- [3] CIGERE TF 38-01-03. Planning against voltage collapse[R]. Paris,France:CIGRE,1987.
- [4] LAKKARAJU T,FELIACHI A. Selection of pilot buses for VAR support considering $N-1$ contingency criteria[C]//Proceedings of IEEE Power Systems Conference and Exposition. Atlanta,GA,USA:IEEE,2006:1513-1517.
- [5] 刘君华,江秀臣,方鸽飞. 一种确定无功源最佳配置地点与数量的新方法[J]. 电网技术,2007,31(16):72-76.
LIU Junhua,JIANG Xiuchen,FANG Gefei. A new method to decide optimal allocation sites and number of reactive sources[J]. Power System Technology,2007,31(16):72-76.
- [6] 张靖,程时杰,文劲宇,等. 通过选择 SVC 安装地点提高静态电压稳定性的新方法[J]. 中国电机工程学报,2007,27(34):7-11.
ZHANG Jing,CHENG Shijie,WEN Jinyu,et al. A novel steady-state voltage stability enhancement method based on SVC allocation[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(34):7-11.
- [7] SAPKOTA B,VITTAL V. Dynamic var planning in a large power system using trajectory sensitivity[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2010,25(1):461-469.
- [8] 黄弘扬,杨汾艳,徐政,等. 基于改进轨迹灵敏度指标的动态无功优化配置方法[J]. 电网技术,2012,36(2):88-94.
HUANG Hongyang,YANG Fenyan,XU Zheng,et al. A dynamic var configuration method based on improved trajectory sensitivity index[J]. Power System Technology,2012,36(2):88-94.
- [9] 袁志昌,刘文华,宋强. 基于暂态电压稳定指标的动态无功优化配置方法[J]. 电力系统自动化,2009,33(14):17-21.
YUAN Zhichang,LIU Wenhua,SONG Qiang. Optimal allocation method of dynamic var compensation based on transient voltage stability index[J]. Automation of Electric Power Systems,2009,33(14):17-21.
- [10] 李帅虎,曹一家,刘光晔. 基于阻抗模裕度指标的动态无功补偿装置优化配置方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(22):3791-3798.
LI Shuaihu,CAO Yijia,LIU Guangye. Optimal allocation method

- of dynamic var compensator based on the impedance modulus margin index[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(22):3791-3798.
- [11] ZHANG Yongjun,CHEN Chao,LI Yong,et al. Dynamic voltage support planning for receiving end power systems based on evaluation of state separating and transferring risks[J]. Electric Power Systems Research,2010,80(12):1520-1527.
- [12] XU Yan,ZHAO Yangdong,MENG Ke,et al. Multi-objective dynamic var planning against short-term voltage instability using a decomposition-based evolutionary algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(6):2813-2822.
- [13] 张勇军,韩东昆,刘巍. 受端电网静态/动态无功补偿综合优化[J]. 电力自动化设备,2009,29(3):32-35.
- ZHANG Yongjun,HAN Dongkun,LIU Wei. Comprehensive optimization of static/dynamic reactive power compensation in the receiving end[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(3):32-35.
- [14] 苏永春,程时杰,文劲宇,等. 电力系统电压稳定性及其研究现状(一)[J]. 电力自动化设备,2006,26(6):97-101.
- SU Yongchun,CHENG Shijie,WEN Jinyu,et al. Research status of voltage stability in power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(6):97-101.
- [15] 袁骏,段献忠,何仰赞,等. 电力系统电压稳定灵敏度分析方法综述[J]. 电网技术,1997,21(9):7-10.
- YUAN Jun,DUAN Xianzhong,HE Yangzan,et al. Summarization of the sensitivity analysis method of voltage stability in power system[J]. Power System Technology,1997,21(9):7-10.
- [16] 段俊东,郭志忠. 一种可在线确定电压稳定运行范围的方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(4):113-120.
- DUAN Jundong,GUO Zhizhong. A new method for on-line determination of the capacity curves of voltage stability [J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(4):113-120.
- [17] 李海琛,刘明波,林舜江. 考虑暂态电压安全的 STATCOM 安装地点选择和容量优化[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(5):69-76.
- LI Haichen,LIU Mingbo,LIN Shunjiang. Selection of STATCOM's installation site and capacity optimization considering transient voltage security[J]. Power System Protection and Control,2011,39(5):69-76.
- [18] 张勇军,任震,钟红梅,等. 基于灾变遗传算法的无功规划优化[J]. 电力系统自动化,2002,26(23):29-32.
- ZHANG Yongjun,REN Zhen,ZHONG Hongmei,et al. Optimal reactive power planning based on Catastrophic genetic algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(23):29-32.
- [19] TIWARI A,AJJARAPU V. Optimal allocation of dynamic VAR support using mixed integer dynamic optimization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(1):305-314.

作者简介:



黄小庆

黄小庆(1981—),女,湖南岳阳人,助理教授,博士,通信作者,从事电力系统分析、新能源接入、电力信息技术等方面的研究(E-mail: misshuang504@126.com);

阮驰骋(1991—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,从事电力系统稳定、安全分析与控制研究。

Optimal dynamic var configuration considering grid characteristics

HUANG Xiaoqing¹,RUAN Chicheng¹,ZOU Jiabin²,CAO Yijia¹,GUAN Weide¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. State Grid Qinghai Electric Power Research Institute, Xining 810008, China)

Abstract: A multi-criterion method of optimal dynamic var configuration considering the characteristics of power grid is presented, which, based on the consideration of grid topology and power distribution, adopts the importance index of nodal voltage stability to screen out the important nodes for maintaining the transient voltage stability of power system; sorts the nodes according to the nodal voltage stability weakness index based on voltage deviation to quickly determine the candidate installation locations of dynamic var compensation devices; applies the improved trajectory sensitivity index to analyze the effect of installation location on the critical clearing time of major faults and the transient voltage stability of whole system for selecting the optimal installation location; checks the installation effect according to the transient voltage stability standard to decide the optimal capacity for obtaining a technically and economically optimized configuration scheme. The proposed method is verified by the simulation for IEEE 39-bus system.

Key words: transient voltage stability; nodal voltage; weakness; importance; improved trajectory sensitivity index; dynamic var optimization; var configuration