[无功补偿]

灵敏度分析法在地区电网无功补偿中的应用

文/北京京电电力工程设计有限公司　张　楠　张　娟
国网北京市电力公司　屈宪军
北京潞电电力设计有限公司　章春晓

灵敏度分析方法具有简单、实用的特点，采用灵敏度分析方法确定无功补偿地点，并根据功率因数进行补偿容量的确定。通过某地区实际110 kV电网的计算，验证了采用的方法的可行性和实用性。

电力系统无功功率优化和无功功率补偿是电力系统安全经济运行的一个重要组成部分。合理地选择无功补偿点，能够有效地维持电压水平并提高电力系统运行的稳定性，还可避免无功的远距离传输，从而降低有功网损和无功网损，使电力系统能够安全经济运行。电力系统无功优化包括2个方面的内容：确定无功补偿点和各个无功补偿节点的补偿容量。电力系统的经济性和可靠性与无功补偿节点的选择密切相关。

在无功优化和无功补偿中，首先要确定合适的补偿点。传统的无功负荷补偿点一般按以下原则确定：

1）根据网络结构的特点，选择几个中枢点实现对其他节点电压的控制。

2）根据无功就地平衡原则，选择无功负荷较大的节点。

3）无功分层平衡，即避免不同电压等级的无功相互流动，以提高系统运行的经济性。

4）网络中的无功补偿不应低于0.7的标准。

该无功补偿原则完全靠规划人员的经验，所确定的无功补偿点不一定是符合实际需要的补偿点。往往有些更需要补偿的点没有得到合理的补偿。因此，这篇文章提出了运用灵敏度分析的方法确定无功补偿地点并给出了计算补偿容量的方法。算例表明本文提出的方法是有效和可行的。

无功补偿地点的确定

灵敏度分析法是一种用于分析电力系统稳态运行的常用算法，主要用于研究电力系统可控变量与状态变量之间的相互关系。

系统的有功网损为

$$P=\sum_{i=1}^{n}U_i\sum_{j=1}^{n}U_j\ (G_{ij}\cos\theta_{ij}+B_{ij}\sin\theta_{ij}) \tag{1}$$

节点无功变化对系统网损的灵敏度为：

$$\partial P/\partial Q_i=(\partial P/\partial U)(\partial U/\partial Q_i)+(\partial P/\partial\theta)(\partial\theta/\partial Q_i) \tag{2}$$

式中，Q、U和θ分别为配网节点注入无功、节点电压幅值与相角。欲得上式，则需进行变换，即

$$\begin{bmatrix}\partial P/\partial U\\ \partial P/\partial\theta\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\partial P_i/\partial U & \partial Q_i/\partial U\\ \partial P_i/\partial\theta & \partial Q_i/\partial\theta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\partial P/\partial P_i\\ \partial P/\partial Q_i\end{bmatrix} \tag{3}$$

最后得出

$$[\partial P/\partial Q_i]=S_{PQi}\begin{bmatrix}\partial P/\partial U\\ \partial P/\partial\theta\end{bmatrix} \tag{4}$$

对于系统中第i个节点，则有

$$\partial P/\partial U_i=2\sum_{j=1}^{n}U_jG_{ij}\cos\theta_{ij} \tag{5}$$

$$\partial P/\partial\theta_i=-2\sum_{j=1}^{n}U_jG_{ij}\sin\theta_{ij} \tag{6}$$

而灵敏度矩阵S_{PQ}中的各元素可由牛顿－拉夫逊法潮流计算中的雅可比矩阵求得。这S_{PQ}是一个$N\times 2N$的矩阵，后面的$\begin{bmatrix}\partial P/\partial U\\ \partial P/\partial\theta\end{bmatrix}$是一个$2N\times 1$的矩阵，在求得各节点的灵敏度系数后，选取每条支路灵敏度最高的几个节点作为无功补偿的候选位置。

无功补偿容量的确定

选择合理的无功补偿容量，能有效提高电网的电压稳定性，保证电网电能质量，提高设备的利用率，降低有功线损和减少用户电费支出。

常用的无功补偿容量方法有以下几种：

（1）按提高功率因数需要来选择。

（2）按降低线损需要来选择。

（3）按提高线路末端电压需要来选择。

（4）按经济无功负荷需要来选择。

（5）由统计估算法来选择。

由于按提高功率因数需要来选择具有简单、实用的特点，所以本文采用这种算法。

根据《功率因数调整电费办法》可知，功率因数是电力部门考核用户用电的一项重要参数。因此，将功率因数维持在合理的范围内，不仅是用户规范用电的要求，也是用户节省电费的一项重要措施。

若某用户最大负荷月的平均有功功率为P，补偿前的功率因数为$\cos^2\phi_1$，补偿后要求达到的功率因数为$\cos^2\phi_2$，则补偿容量Q_c可用下述公式计算：

$$Q_c=P(\tan\phi_1-\tan\phi_2)=Q(1-\frac{\tan\phi_2}{\tan\phi_1}) \quad (7)$$

$$Q_c=P(\sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_1}}-1\sqrt{\frac{1}{\cos^2\phi_2}}-1) \quad (8)$$

式中，Q_c为所需补偿容量，kvar；P为最大有功功率，kW；Q为最大无功功率，kvar。

$\cos^2\phi_1$应采用最大负荷时功率因数；$\cos^2\phi_2$的确定必须适当，可以参考当地电力部门对功率因数的要求。

算例仿真

1．算法流程

（1）输入网络参数。

（2）计算灵敏度系数，并比较其大小。

（3）根据灵敏度系数的大小选出几个较大的作为无功补偿候选点。

（4）对选定的无功补偿点进行无功补偿，用下文提到的方法进行补偿容量的选择。

2．算例

为验证本文提出的灵敏度分析法在地区电网无功补偿中的应用，本文利用某地110 kV电网作为实际算例。

110 kV电网有2个220 kV变电站，10个110 kV变电站，运行17台变压器，运行线路17条，线损率为0.653%。

表1为这个系统运行的变压器的功率因数分布表。

表1　变压器功率因数分布

功率因数	>0.9	0.9～0.8	0.8～0.7	0.7～0.4
台数	11	3	1	2
台数占比（%）	64.7	17.65	5.88	11.76

从上表可见，功率因数在0.9之上的有11台，在0.8～0.9之间的有3台，0.8～0.7之间的有1台，低于0.7的有2台。

对上文的18节点系统作为计算模型，其模型如图1所示，以在3个节点上安装补偿设备为例进行仿真计算（如采用电容器调节）。主要参数选取如下：选节点1为平衡节点，其他发电机节点作为PV节点。

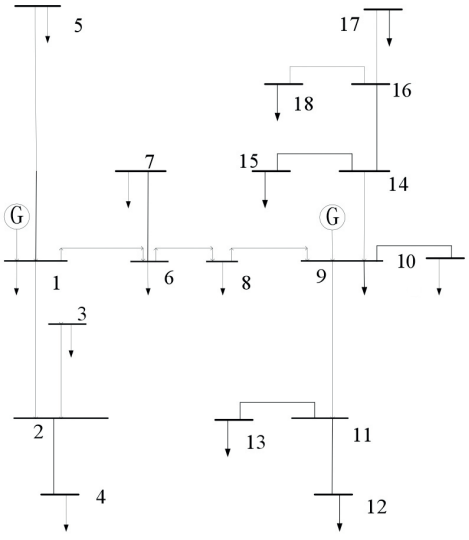

图1　18节点无功补偿系统图

首先通过灵敏度系数的计算得到灵敏度矩阵，通过比较找出灵敏度系数较大的补偿节点，首先计算出来的灵敏度系数中节点7、8、18的灵敏度系数较大，把它们作为无功补偿候选节点，对其进行无功补偿，以提高功率因数。

表2为功率因数改变对线损的影响。

表2　功率因数变化与线损的关系

功率因数	线损	总损	线损率	总损率
未补偿前	1 020.69	2 375.32	0.429 7	0.653
0.85	1 012.22	2 363.48	0.428 3	0.642
0.9	1 000.3	2 347.98	0.426 0	0.633
0.95	984.54	2 329.34	0.422 7	0.624
同比变化量	−36.15	−45.98	−0.00704	−0.03
同比百分数（%）	−3.5417	−1.935 7	−1.637 7	−4.441

通过上表可见，功率因数对线损的影响是很大的，功率因数主要影响变压器的铁损和线路的损失。功率因数提高，变压器的铁损降了9.41，占总损失下降的1.079%，线路的损失降了

（下转第64页）

隔离，减少故障率。为减少工件撞击引起行程开关位置改变，使用接近开关来检测部件的到位情况，使用行程开关来进行部件的限位保护。

通过分析，ZFTK500锥齿轮铣齿机电气控制系统需要30个输入信号，15个输出信号，考虑今后可能的扩展，要求PLC的I/O口有一定冗余。经过优化比较，选用日立E－64HR型PLC，其中输入点数40点，输出点数24点，输出方式为继电器输出，采用交流220 V供电，在这里，可以用开关SA1切换PLC的STA和STO实现铣床工作状态的手动和自动转换，非常方便。

根据输入信号与需要执行的动作， 进行I/O口分配，具体外部接线和分配如图4所示。使用HIDIC日立公司编程软件LADDER EDITER for Windows，编程时使用辅助继电器触点去驱动接触器线圈，再由接触器的触点去控制电动机和电磁离合器的动作，这样可避免PLC的输出接口直接与驱动设备（电动机和电磁离合器）接在一起，保护PLC。

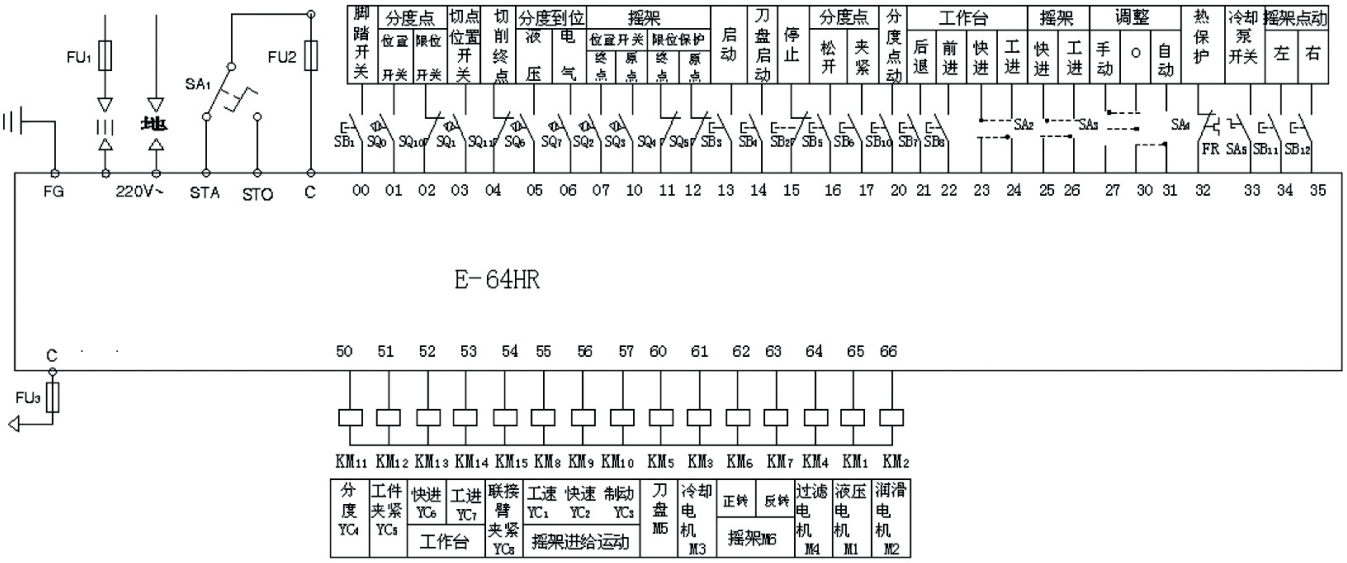

图4　I/O口分配和外部接线图

结束语

经过改造后的机床已经投入使用，并且能够正常稳定运行，设备故障率降低了，加工效率也得到了提高，企业收到了良好的经济效益。EA

（收稿日期：2015.07.31）
（编辑：白文亭）

（上接第59页）

36.15，占总损失下降的3.5417%。通过无功补偿，系统的总损失下降了4.441%。

表3所示的是功率因数与补偿容量之间的关系。

表3　功率因数变化与线损的关系

节点	有功负荷/MW	改善后功率因数	补偿容量/MW	电压范围/kV
7	15.94	0.8～0.85	9.08～11.32	109.9～109.5
		0.85～0.9	11.32～13.48	109.5～109.3
		0.9～0.95	13.48～14.88	109.3～108.9
8	14.42	0.8～0.85	18.55～20.43	109.8～109.5
		0.85～0.9	20.43～22.38	109.5～109.1
		0.9～0.95	22.38～24.64	109.1～108.9
18	5.34	0.9～0.95	1～1.83	109.8～109.3

从上面的表中可以看出，随着功率因数的增加，需要补偿的容量也越来越大。电压波动也在相应的范围内。

结束语

本文采用灵敏度分析对无功补偿点进行确定，并在此补偿点进行无功补偿以提高功率因数。运用某地18节点系统进行仿真计算，验证了该方法的实用性和简单性。EA

（收稿日期：2015.07.31）
（编辑：白文亭）