一种220 kV变电站无功补偿电源容量的实用计算方法

全局无功优化在实际中很难直接实现。为使局部无功优化达到理想效果，提出了一种220 kV变电站无功补偿电源容量的实用计算方法。将主变压器、预测负荷和线路的无功损耗之和作为补偿容量，给出了相应的求解公式，并确定了分组容量。经实例检验，本方法能有效求解无功补偿电源容量，既考虑了负荷及线路情况，又为系统补偿了充足的无功电源。该算法可作为一种行之有效的220 kV变电站无功补偿电源容量的实用计算方法。

傅守强　李红建　刘素伊　赵旷怡　张立斌／国网冀北电力有限公司经济技术研究院

傅守强／助理工程师

关键词／Keywords
无功优化·
无功电源补偿·
容量分组校验·

0　引言

对系统实施无功补偿和保证无功平衡是提高电压质量的最基本前提。对全网进行无功补偿优化过于庞大，无论在求解还是实际控制上都很难做到[1]。根据电力系统无功就地平衡、减少不同电压等级间和远距离输送的原则，如果无功补偿在分层、分区内平衡，上下级协同通过负荷预测的需求来调控，就可以达到预期效果[2]。

相对于全局的无功优化，各自局部无功优化是有效方法，被大多数地区变电站采用。就单个变电站而言，这种控制方式提高了电压合格率，降低了系统网损[3-4]。

作为集中安装无功补偿电源的主要场所，各级变电站承担着无功调节的重要任务。根据规定，220 kV变电站的容性无功补偿以补偿主变压器无功损耗为主，适当补偿部分线路及兼顾负荷侧的无功损耗[5-6]。本文在此基础上给出一种求解变电站无功补偿电源容量的实用计算方法，并经过校验和对比得出此方法有效易行的结论。

1　无功补偿电源容量模型与算法

相较文献[5]中的要求，本着系统无功补偿容量充裕的原则，本文将220 kV变电站所需无功补偿电源容量定位为对主变压器、负荷侧和线路消耗的无功损耗的全额补偿，即

$$\Delta Q=\Delta Q_{\mathrm{T}}+\Delta Q_{\mathrm{C}}+\Delta Q_{\mathrm{L}} \qquad (1)$$

式中，ΔQ_{T}为主变压器无功损耗；ΔQ_{C}为负荷的无功损耗；ΔQ_{L}为线路的无功损耗。

（1）主变压器无功损耗计算

主变压器无功损耗计算公式为[7]

$$\Delta Q_{\mathrm{T}}=\left[\frac{I_0(\%)}{100}+\frac{U_{\mathrm{d}}(\%)I_{\mathrm{m}}^2}{100I_{\mathrm{n}}^2}\right]S_{\mathrm{e}} \qquad (2)$$

式中，$I_0(\%)$为变压器空载电流百分比（%）；$U_{\mathrm{d}}(\%)$为需要进行补偿的变压器一侧的阻抗电压百分比（%）；I_{m}为母线装设补偿装置后，通过变压器需要补偿一侧的最大负荷电流值，kA；I_{n}为变压器需要补偿一侧的额定电流值，kA；S_{e}为变压器需要补偿一侧的额定容量，MV·A。

根据上述公式，在主变压器型式确定的情况下，变压器无功损耗与主变压器各侧实际通过的功率有关，即与主变压器负荷率、中低侧负荷分布等有关。

（2）负荷无功损耗计算

负荷侧的无功损耗计算公式为

$$\Delta Q_{\mathrm{C}}=Q_{\mathrm{js}}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2) \qquad (3)$$

式中，Q_{js}为计算有功负荷；φ_1为补偿前

的功率因数角；φ_2为补偿后的功率因数角。

（3）线路无功损耗计算

线路的等效电路采用π形等效电路，如图1所示。

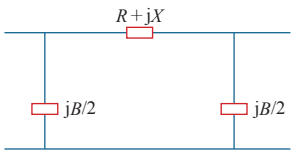

图1　电力线路的等效电路

充电ΔQ_L功率的计算公式为

$$\Delta Q_L = U^2 B \tag{4}$$

电抗器一般在变电站投运初期，即负荷较低时补偿进线充电功率。

根据式（1）～式（4）可知，负荷侧的无功损耗与所需补偿到的功率因数有关。

因此，变电站所需补偿无功总容量与以下四因素有关：①主变压器负荷情况；②主变压器高压侧功率因数控制水平；③中、低侧负荷分布；④线路参数。

2　实例分析

2.1　计算过程

以某220 kV变电站A为实例，原方案中无功补偿采用并联电容器及并联电抗器方式进行，电容器按照主变压器容量的17.8%配置，每台主变压器配置4×8 Mvar并联电容器及1×10 Mvar并联电抗器。按照本文方法计算所需的补偿无功电源容量。

2.1.1　无功电源需求

A变电站主变压器阻抗电压（高中/高低/中低）为：$U_{k1-2}(\%)=13$；$U_{k1-3}(\%)=64$；$U_{k2-3}(\%)=47$；主变压器$I_0(\%)$值为0.4。

2017年本期两台180 MV·A 主变压器投运后，计算每台主变压器无功损耗如下：$\Delta Q_0=\dfrac{I_0(\%)}{100}S_e=0.72$ Mvar；$\Delta Q_{T1}=3.296$ Mvar；$\Delta Q_{T2}=-0.376$ Mvar；$\Delta Q_{T3}=0.122$ Mvar；$\Delta Q_T=\Delta Q_0+\Delta Q_{Th\ (h=1,2,3)}=3.76$ Mvar。

投运年最大负荷按统计数据计算，远景年三台180 MV·A主变压器中考虑满足$N-1$校验，另两台主变压器允许过负荷1.3倍时，为主变压器的最大供电能力情况，即承担有功负荷468 MW（平均每台主变压器负荷156 MW）时，10 kV负荷按10%计。低谷负荷按照高峰负荷的60%计，考虑到为主变压器留足裕量，不计负荷的同时率。变电站单台负荷统计如表1所示。

表1　A变电站单台负荷情况

（单位：MW）

时段 \ 电压等级		220 kV	110 kV	10 kV
本期负荷	高峰	59.75	55.25	4.5
	低谷	71.7	33.15	2.7
远期负荷	高峰	156.0	140.4	15.6
	低谷	93.6	84.24	9.36

设补偿前的功率因数为0.95，单台主变压器功率因数补偿至0.98，计算得：$\Delta Q_C=Q_{js}(\tan\varphi_1-\tan\varphi_2)=7.51$ Mvar。

A变电站4回220 kV出线和5回110 kV出线全部为架空线，充电功率很小。经计算为220 kV线路的充电功率为1.4 Mvar，110 kV线路的充电功率为0.48 Mvar。

故变电站所需无功补偿容量为：$\Delta Q=\Delta Q_T+\Delta Q_C+\Delta Q_L=11.27$ Mvar。

2.1.2　电源分组容量确定及校验

由计算容量可知，A变电站所需无功补偿电源可暂定为2×8 Mvar并联电容器，下面就每组8 Mvar容量进行检验。并联电容器的分组容量应满足下列要求。

（1）电压波动校验

根据规定投切一组补偿电容，引起所接母线电压的变动值不宜超过额定电压的2.5%[7]。按照文献[8]中给出的经验算法得

$$\Delta U(\%)\approx\frac{Q_c}{S_d}\times100\% \tag{5}$$

即每次投入的并联电容器组引起的电压波动比例大概相当于投入的无功量占三相短路容量的百分比。

根据基准容量及系统参数可得A变电站10 kV侧三相短路容量347.71 MV·A，相应可以计算出并联电容器的分组限值为8.69 Mvar。因而选用单组

容量8 Mvar的低压并联电容器满足要求。

（2）发生谐振的电容器容量

分组装置投切时，不得引起高次谐波谐振，应避免有危害的谐波放大[9]。发生谐振的电容器容量可表示为

$$Q_{cx}=S_d\left(\frac{1}{n^2}-K\right) \tag{6}$$

式中，Q_{cx}为发生n次谐波谐振的电容器容量，Mvar；S_d为并联电容器装置安装处的母线短路容量，MV·A；n为谐波次数，即谐波频率与电网基波频率之比；K为串联电抗器的感抗与并联电容器组的容抗之比，即电抗率。

不引起高次谐波谐振的条件是：$Q_{cx}\neq Q_{fz}N$，N为分组数。

计算条件：$S_d=347.71$ MV·A，$K=5\%$。

因为$K=5\%$，因此能限制5次及以上的谐波，只需校验3次谐波，即$n=3$。所以，$Q_{cx}=21.25$ Mvar$\neq 2\times 8$ Mvar，因此不会引起3次谐波谐振。

（3）电容器组投入电网时的涌流计算

根据规定，合闸涌流限制不超过电容器组额定电流的20倍[10]。

$$\begin{aligned}&Q=Q'+Q_0\\&\beta=1-\frac{1}{\sqrt{1+\dfrac{Q}{KS_d}}}\\&I_{ym}^{*}=\frac{1}{\sqrt{K}}\left(1-\beta\frac{Q_0}{Q}\right)+1\end{aligned} \tag{7}$$

式中，I_{ym}^{*}为涌流峰值的标幺值（以投入的电容器组额定电流峰值为基准值）；Q为同一母线上装设的电容器组总容量，Mvar；Q_0为正在投入的电容器组容量，Mvar；Q'为所有正在运行的电容器组容量，Mvar；β为电源影响系数。

1）当正在运行的电容器组数为0、正在投入的电容器组数为1时，$Q_0=8$ Mvar，$Q'=0$ Mvar，$K=5\%$，则

$$\begin{aligned}&Q=Q'+Q_0=8\ \text{Mvar}\\&\beta=1-\frac{1}{\sqrt{1+\dfrac{Q}{KS_d}}}=0.172\end{aligned} \tag{8}$$

$$I_{ym}^{*}=\frac{1}{\sqrt{K}}\left(1-\beta\frac{Q_0}{Q}\right)+1=4.70$$

2）当正在运行的电容器组数为1、正在投入的电容器组数为1时，$Q_0=8$ Mvar，$Q'=8$ Mvar，$K=5\%$，则

$$\begin{aligned}&Q=Q'+Q_0=16\ \text{Mvar}\\&\beta=1-\frac{1}{\sqrt{1+\dfrac{Q}{KS_d}}}=0.278\\&I_{ym}^{*}=\frac{1}{\sqrt{K}}\left(1-\beta\frac{Q_0}{Q}\right)+1=4.85\end{aligned} \tag{9}$$

经上述校验可知，均小于20，满足要求。单台主变压器配置2×8 Mvar的电容器组满足要求。

2.2 结果分析

综上，无功补偿前A变电站每台主变压器无功平衡结果如表2所示。

表2 无功补偿前A变电站每台主变压器无功平衡结果

指标	本期		远期	
	高峰负荷	低谷负荷	高峰负荷	低谷负荷
110 kV侧有功负荷/MW	55.25	33.15	140.4	84.24
110 kV功率因数	0.95	0.95	0.95	0.95
110 kV侧无功负荷/Mvar	18.16	10.90	46.15	27.69
10 kV侧有功负荷/MW	4.5	2.7	15.6	9.36
10 kV功率因数	0.95	0.95	0.95	0.95
10 kV侧无功负荷/Mvar	1.48	0.89	5.13	3.08
220 kV电缆充电功率/MW	−0.4	−0.4	−5.4	−5.4
110 kV电缆充电功率/MW	−0.48	−0.48	−1.48	−1.48
主变压器无功损耗/Mvar	3.76	1.82	22.23	8.46
变电站无功盈（+）亏（−）/Mvar	21.52	11.72	66.63	32.35
220 kV侧有功负荷/MW	59.75	35.85	156	93.6
主变压器高压侧功率因数	0.935 7	0.942 4	0.919 6	0.945 1

高峰负荷应投切所有并联电容器，低谷负荷应投切所有并联电抗器。分别对比本期和远景的高峰负荷、低谷负荷时补偿前、原方案及本文算法的补偿效果，如图2、图3所示。因本方案取消了并联电抗器，故低谷负荷时不投切并联电容器。

220 kV变电所在主变压器为最大负荷时，其一次侧功率因数应不低于0.95，在低谷负荷时功

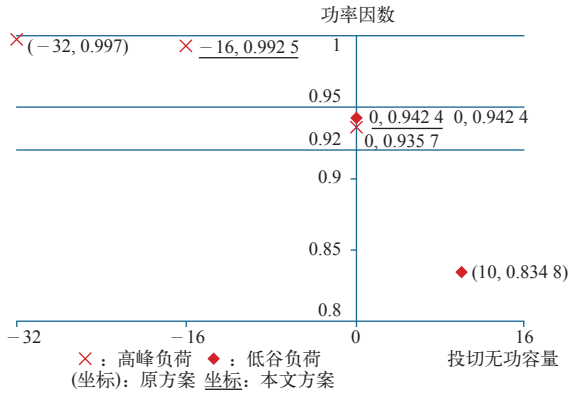

图2　本期各方案无功补偿与功率因数对应关系比较

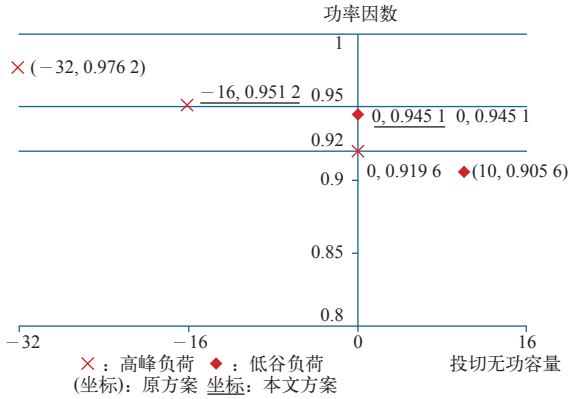

图3　远景各方案无功补偿与功率因数对应关系比较

率因数应在0.92～0.95范围内。考虑最大负荷时，无论本期还是远景年，原方案的功率因数都高于本文方案，但本文方案也均满足要求，且经济性明显优于原方案。即使本文方案中功率因数的最小值为0.951 2，较原方案低0.025，但仍符合《电力系统无功补偿配置技术原则》要求。低谷负荷时，原方案显著低于技术原则指标，功率因数不合格，而本文方案在要求范围内，符合要求。因此，选择每台主变压器配置2×8 Mvar的并联电容器，符合技术要求。相较原方案，减少50%并联电容器容量，取消并联电抗器。设备投资少，占用空间小，经济性显著提高。

3　结束语

本文提供了一种220 kV变电站无功补偿电源容量的实用计算方法，即将变压器无功损耗、负荷侧及线路的无功损耗之和作为补偿容量。这种方法解决了全局优化中存在的节点过多、变量过多、数据庞大以及难以求解的问题。而相较于《电力系统无功补偿配置技术原则》，对负荷侧及线路的无功损耗的全额补偿又为变电站留足了无功裕量。从而由每个变电站无功补偿电源容量的优化达到整个系统的无功优化。经过实例计算分析达到很好的效果。下一步的研究重点将是在局部无功优化过程中建立经济性最优模型，在满足电压和功率因数合格的约束条件下求取最优配置。

参考文献

[1] 韩祯祥．电力系统分析 [M]．5版．杭州：浙江大学出版社，2011：200-204．

[2] 王承民，段建民，徐冉，等．城市电网变电站无功优化配置的数学模型及算法研究 [J]．电气应用，2009 (12)：56-60．

[3] 李广福．基于负荷预测的变电站电压无功优化控制策略研究 [D]．天津：天津大学，2010．

[4] 吕志鹏，罗安，帅智康，等．变电站无功电压协同优化及复合控制系统研究 [J]．中国电机工程学报，2009 (34)：50-56．

[5] 国家电网公司．电力系统无功补偿配置技术原则 [S]．2008．

[6] 中华人民共和国能源部．电力系统电压和无功技术导则 [S]．1989．

[7] 刘方蓝．抑制电压波动和闪变的并补控制策略研究 [D]．重庆：重庆大学，2006．

[8] 水利电力部西北电力设计院．电力工程电气设计手册电气一次部分 [M]．北京：中国电力出版社，1989：476-477．

[9] 张澧生，施佳，郭超，等．配电网电压无功和谐波综合控制研究 [J]．电源技术，2014 (1)：152-155．

[10] 张严．变压器励磁涌流识别和抑制技术的研究 [D]．长沙：湖南大学，2014．

（收稿日期：2015－12－12）EA