



特高压电网无功补偿设计和运行方法研究

唐寅生¹, 盛万兴², 蒋 凯³

(1. 湖南电力调度通信中心, 长沙410007; 2. 中国电力科学研究院 北京
100085; 3. 湖南省电力试验研究所, 长沙410007)

[摘要]: 介绍了基于经济压差无功潮流的特高压电网无功补偿设计和运行方法, 并进一步用例题证明了这种方法的实用性、可操作性和科学性。验证了因线路跳闸负荷转移引起大幅度电压降低时, 如果用MCR作高抗, 将导通角立即全关, 对迅速提升电压好作用。

[关键词]: 特高压 无功 经济压差 补偿设计 运行

每100km的1000kV特高压输电线路的充电功率有530Mvar左右, 约为同等长度的500kV输电线路的5倍, 因此, 研究特高压电网的无功输送, 即研究特高压电网的无功补偿设计和运行方法, 是个非常有意义的问题, 目的是既能抑制操作及甩负荷时工频过电压, 又可抑制稳态方式下因电容效应产生的电压异常升高, 还可提高输送能力, 保证电网运行的安全、优质与经济性能。内容包括确定无功补偿的原则、方法与程序, 输电线路与变电站(发电厂)无功补偿的布点、容量、选型、及其调节方法^[1, 2]。

1 ΔU_J 的定义、算法与程序

1.1 定义

维持输电线路无功功率潮流的分点恰恰位于线路中点的线路首、末两端的电压之差, 称为经济压差^[3]。

1.2 算法

ΔU_J 无功功率潮流算法, 全称“电力系统无功功率自动控制方法”算法^[4]。

计算网络与模型:

简化计算网络, 升、降变压器不直接参与潮流计算; 计算网络按电压分层计算。

数学模型、目标函数

$$\min \Delta U = (PR + QX) / U$$

变量及约束:

控制变量 Q_1 、 Q_2 。无约束。

状态变量 $U_{1(2)\min}$ $U_{1(2)}$ $U_{1(2)\max}$

调整变量 Q_f —发电机无功连续调节; $Q_{(L, C)}$ —补偿电容(抗); K_1 、 K_2 —变压器变比; 等不直



接参与 OPF 最优无功功率控制计算, 在执行机构调控策略中靠档运行。并假定 Q_{LC} 、 K 为连续调节。

1.3 程序

U_j 潮流程序。

以保证电网随时都运行在相当于输送自然功率潮流的方式下。

2 无功补偿设计

2.1 原则

就地(分层)平衡, 变电站之间与穿越变压器的无功应尽量少;

有最少的补偿投资;

线路、变压器事故跳闸后, 或者交直流混合电网发生直流闭锁时, 在潮流转移通道上的发电厂、变电站有能力尽快向线路提供应有的容性无功补偿, 防止电网瓦解^[5]。

2.2 并联电抗器

2.2.1 总容量

输电线路无功平衡的传统方法是同时使用高、低压并联电抗器。

无输电线路的无功平衡方程式^[6]是:

$$\frac{1}{2}(U^2 B - 3I^2 X_L) + \frac{U^2}{X_{HV}} + Q_{LV} = 0$$

高、低压并联电抗器的总容量为:

$$Q_{gen} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^n (U^2 B - 3I^2 X_L) = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^n \Delta Q$$

式中: Q_{LV} —低压电抗器容量;

$U^2 B$ —线路充电无功;

$3I^2 X$ —枯小方式下线路的无功损失;

X_{HV} —高压并抗的电抗值;

ΔQ —1条线路的过剩无功;

n —母线上连接的线路条数。

2.2.2 高压并联电抗器

布点: 在每条输电线路的两端对称安装容量相等的高压并联电抗器。

容量: 按操作过电压的要求, 同时考虑避免工频谐振和满足大负荷方式补偿的需要确定 Q_{HV} 。高抗的

补偿度一般控制在90%以下。

选型: 有固定容量的高压电抗器或高压可控电抗器, 可控饱和并联电抗器(CSR), 自饱和并联电抗器(SR), 晶闸管控制(TCR), 晶闸管控制变压器(TCT), 还有近几年发展起来的磁控电抗器(Magnetically Controlled Reactor-MCR^{[7][8]})可供选择。MCR可控性好, 优先选用。



2.3 变电站无功补偿

(发电厂的无功出力效验相同)。

变电站无功平衡方程式:

$$\sum_{n=1}^n \left(\frac{1}{2} \Delta Q_{1000\max} + \frac{1}{2} \Delta Q_{500\max} \right) + \sum_{n=1}^n Q_{HV} + \Delta Q_T + Q_{\text{comp}} + Q_{L500} = 0$$

式中: $\Delta Q_{1000\max}$ —丰大方式1000kV母线连接线路过剩无功; $\Delta Q_{500\max}$ —丰大方式500kV母线连接线路过剩无功;

ΔQ_T —变压器损失;

Q_{comp} —补偿容量;

Q_{L500} —500kV母线上的无功负荷, 等于0。

2.3.1 电容器容量

$$Q_C = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^n (\Delta Q_{1000\max} + \Delta Q_{500\max}) \sum_{n=1}^n Q_{HV} + \Delta Q_{T\max} \quad \text{式中: } Q_{HV} \text{—高压并联电抗器容量;}$$

$\Delta Q_{T\max}$ —丰大方式变压器无功损失。

2.3.2 低压并联电抗器容量

$$Q_{LV} = Q_{\text{gen}} - Q_{HV} - \Delta Q_{T\min}$$

式中: $\Delta Q_{T\min}$ —枯小方式下变压器的无功损失。

2.3.3 选型

电容器组宜与TCR或MCR结合, 组成BASED MCR-SVC或BASED TCR-SVC, 以获得可控性。

3 电压控制

3.1 任务

科学的运用无功补偿容量及其调节能力, 维持线路有最小的电压损失, 力求保持送、受端电压基本相等。随时达到:

保持正常方式下和事故后电网中各母线电压值不超过规定限额;

保持电力系统的安全稳定运行;

使电网在经济状态下运行, 有最小的线损率。

3.2 本质

根据1000kV电网对运行电压水平的要求, 优化组合全网变压器的分接头, 调节维持无功的就地(分层)平衡, 使电网运行在既有给定电压水平、又有优化无功潮流的方式下。

3.3 调节控制方法

自动电压控制。有两个特征: 自动控制与无功优化。



控制界面：各厂站并入电网的连接点，即升、降压变压器的高压侧。

控制目标：给定电压约束下的注入电网无功的实时值逐渐接近优化目标值。

3.3.1 MCR 控制

目的是平衡线路无功。

MCR的实时出力（ MCR_{ret} ）是运行电压 U^2 及线路输送功率 P^2 的函数：

$$MCR_{ret} = f(U^2, P^2)$$

3.3.2 SVC 控制

控制界面：变压器高压侧线圈。

无功实时值（ Q_{ret} ）以无功实时优化值 Q_{opt} 为参考量 Q_{ref} ，实施闭环控制。

$$Q_{ref} = \frac{1}{2} \sum_{n=1}^n (\Delta Q_{1000ret} + Q_{HVret})$$

3.3.3 Q_{ret} 分析：

当：

$$\sum_{n=1}^n (U^2 - 3I^2 X + Q_{HVret}) = 0 \text{ 时, } Q_{ret} = 0;$$

$$\sum_{n=1}^n (U^2 - 3I^2 X + Q_{HVret}) > 0 \text{ 时, } Q_{ret} < 0, \text{ 流入变压器;}$$

$$\sum_{n=1}^n (U^2 - 3I^2 X + Q_{HVret}) < 0 \text{ 时, } Q_{ret} > 0, \text{ 流出变压器。}$$

3.3.4 变压器分接头调节闭锁

当控制界面的实时无功超过目标无功要求时，变压器分接头调节实施闭锁，防止电压调节的负作用。

4 算例

为进一步说明上述的特高压电网无功补偿设计和运行方及它的科学性与控制原理，用设计中的1000kV芜湖、南京、徐州三个变电站及其相邻的两段线路组成输电系统，芜湖变电站为送出端，南京及徐州变电站等值到变电站高压母线上的负荷分别为（7000+j2000）、（5000+j1500）MVA，线路参数见表1，计算 ΔU_j 优化潮流，并与初始潮流进行比较。

4.1 线路参数表

表1：线路计算参数表

单位：pu，基准值：100Mvar、525kV、km

起至	回路				高压并抗



		电阻 (R)	电抗 (X)	电纳 (B)	首端		末端		长度
					容量	电抗	容量	电抗	
芜湖—南京		0.00009	0.00226	5.0984			4.3736	0.26333	100
芜湖—南京		0.00009	0.00226	5.0984	4.3736	0.26333			100
南京—徐州		0.0003	0.0077	17.3347	6.5603	0.17556	6.5603	0.17556	340
南京—徐州		0.0003	0.0077	17.3347	6.5603	0.17556	6.5603	0.17556	340

4.2 潮流图

用1条线表示双回线。初始与优化潮流分别示于图1、图2。

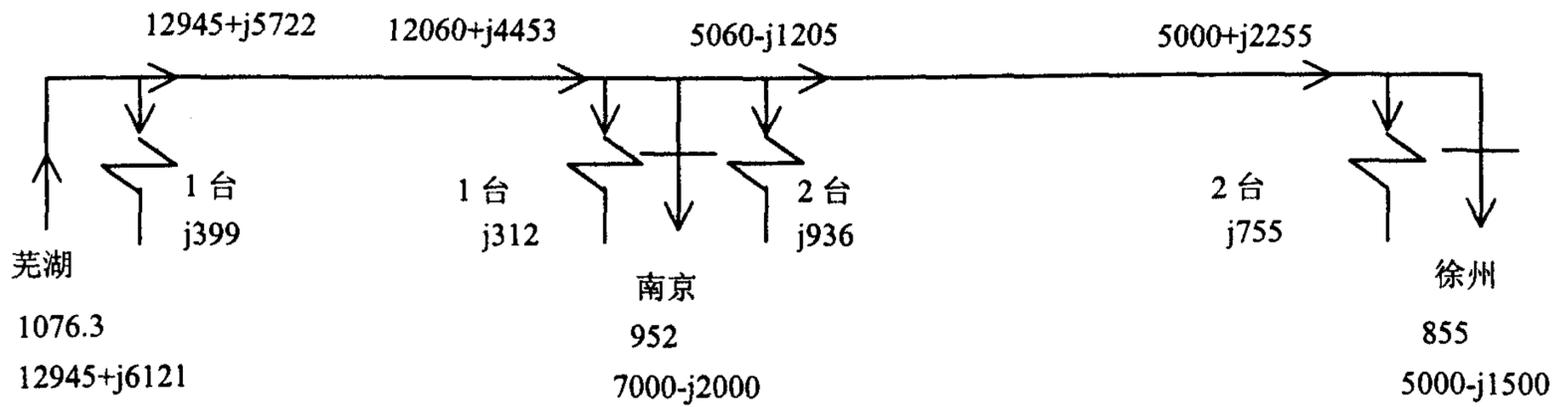


图1 初始潮流图

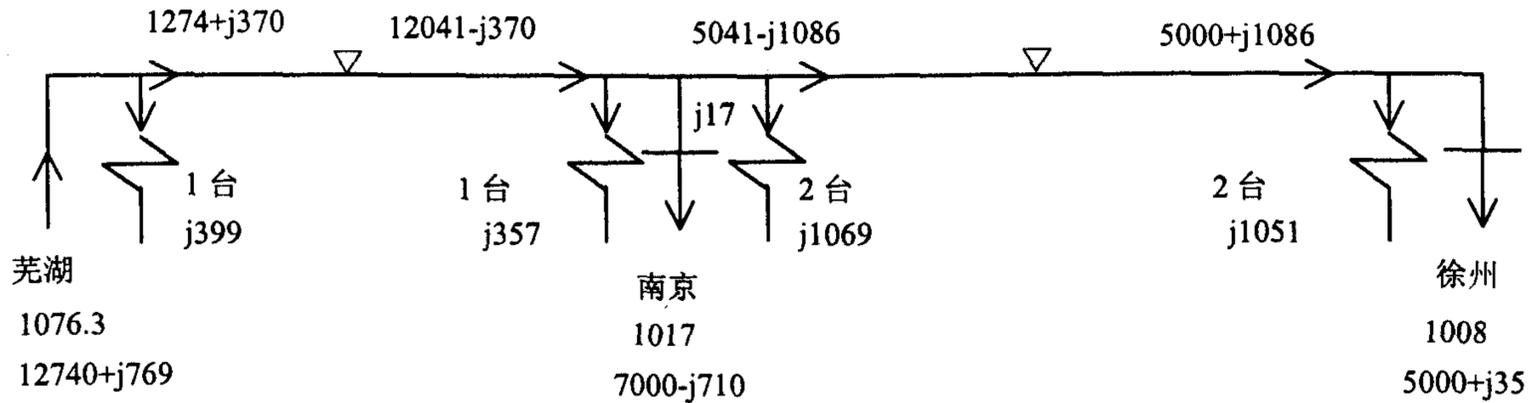


图2 ΔU_j 潮流图

4.3 优化前后比较表

表2 负荷与电压优化前后比较表

分项	节点	初始		优化		差值, 或 %
负荷	芜湖	12945+j6121	MVA	12740+j769	MVA	205+j5352
	南京	7000+j2000		7000j-710		j2710
	徐州	5000+j1500		5000j-35		j1535
电压	芜湖	1076	kV	1076	kV	0
	南京	952		1017		6.83



	徐州	855		1008		17.90
--	----	-----	--	------	--	-------

优化前后芜湖对徐州电压相角差分别为：-22.2879与-20.0883， 2.2016（度）。

优化前后线路损失分别为：945与740（Mw）， 21.7%。

表3：无功平衡表

单位：Mvar

无功		电源				负载				
分项	芜湖	充电功率	南京	徐州	合计	南京	徐州	高抗损失	线路损失	合计
初始方式	6120.6	3517.43	-	-	9638.03	2000	1500	2402	3736.03	9638.03
优化方式	768.96	4238.9	710.4	-	5718.26	-	34.78	2876	2807.48	5718.26
比较	±	-5351.64	721.47	710.4	-3919.77	2000	1465.22	928.55	928.55	3919.77
	%	87.4	20.5	-	-40.7	100	97.7	38.7	-24.9	-40.7

4.4 运行分析

4.4.1 电压质量提高及线损减少原因

4.4.1.1 无功做到就地

用电无功不特高压V电网供。

4.4.1.2 无功分区平衡

南京至徐州段，每回线输送2500MW < 自然功率，线路容性的过剩无功有2176Mvar，呈容性，由本线的两侧等量吸收了1086Mvar，保持了良好的无功平衡状况与电压质量。因为高抗吸收了1051Mvar，所以，徐州变电站仅吸收35Mvar。

同理，芜湖至南京段，每回线输送6000MW > 自然功率，线路的过剩无功有740Mvar，呈感性，由本线的两侧等量吸收了370Mvar过剩无功，但，高抗需要390Mvar，所以芜湖变电站需要有电容器补偿容量769Mvar，南京需要710Mvar。

以线路中点开始，其左右两个无功平衡区的平衡状态为：

芜湖 南京段芜湖一侧：769+370-399=0；

南京左右两侧：710+1086-357-1069-370=0；

南京 徐州段徐州一侧：1086-1051-35=0。

4.4.2 电压控制方法

实施了在给定电压约束下的以注入电网 Q_{opt} 为目标的电压控制方法。变压器第3线圈的SVC出力，以 $Q_{ref} = Q_{opt}$ 为参考量 Q_{ref} ，实施闭环控制，待各界面 $Q_{ref} = Q_{opt}$ 时，输电系统就有接近图2的优化潮流。因为 $Q_{ref} = Q_{opt}$ 唯一。

如果使用MCR，在一定出力范围内，MCR可以与SVC配合调整。

各界面无功最优值：

芜湖： $Q_{ref} = 877 + 399 - 507 = 769$ （Mvar）



南京: $Q_{ref} = 1086 - 370 - 1069 - 357 = 710$ (Mvar)

徐州: $Q_{ref} = 1086 - 1051 = 35$ (Mvar)

4.4.3 变电站无功补偿容量

芜湖: $Q_{comp} = Q_{ref} + \Delta Q_{Tmax} = 769 + \Delta Q_{Tmax}$ (Mvar)

南京: $Q_{comp} = Q_{ref} + \Delta Q_{Tmax} = 710 + \Delta Q_{Tmax}$ (Mvar)

徐州: $Q_{comp} = Q_{ref} + \Delta Q_{Tmax} = -35 + \Delta Q_{Tmax}$ (Mvar)

使用丰大、枯小方式, 计算各点注入电网无功的最优值, 加上对应的变压器无功损耗就是变电站应该有的无功补偿容量, 并进行(n-1)方式效核。

4.4.4 线路跳闸时负荷转移过程中 MCR 立即全关对提升电压的作用

表4中的数据说明了线路跳闸时负荷转移过程中MCR立即全关对提升电压的好作用。

表4: 南京至徐州段1回线跳闸后切MCR增加无功送出提升电压的作用

单位: Mvar

方式	电压		负荷	充电 功率	无功 损失	注入系统无功		高抗无功	
	南京	徐州				南京	徐州	南京	徐州
正常	1017	1008	5000	3226	1056	710.4	-34.78	1069 (2台)	1051 (2台)
1回线跳闸	982	837	5000	1301	3032	710.4	-34.78	498 (1台)	362 (1台)
MCR全关	936	1040	5000	1478	2466	710.4	-34.78	0	0
南京、徐州增加无功送出	1017	1000	5000	1600	2227	1056	322	0	0

5 结束语

使用基于 U_j 的无功补偿程序对所有电压等级的电网进行控制, 就是全网无功优化运行, 可以使电力系统的一系列技术经济指标得到改善, 保证电网的安全、优质、经济运行。全网无功优化运行问题, 在设计与运行控制方法解决以后, 关键的问题是解决动态跟踪补偿技术。BASED MCR-SVC有适合于高、低压电网、大、小容量、占地面积少, 谐波指标好等特点, 系列产品都有符合要求的技术经济指标, 仅用线损降低计算回收年限, 只要4~5年左右, 电压质量提高、安全与社会效益更大。

发展BASED MCR-SVC, 是使电力系统的电压控制由现在的以电压为目标值的调压方法走向AVC的必由之路, 符合科学发展观。

参考文献

- [1] 刘振亚, 特高压电网, 中国经济出版社, 2005.10第一版.
- [2] 舒印彪, 我国特高压输电的发展与实施, 中国电力, 2005、11 (38.11) .
- [3] 超高压输电系统无功经济运行问题, 能源部电力科学研究院, 1988.
- [4] 唐寅生, 李碧君, 电力系统OPF全网最优无功的经济压差算法及其应用[J], 中国电力, 2000, 33(9), 42-44
- [5] 王梅义等, 大电网系统技术, 中国电力系统出版社, 1975.6 第二版.



- [6] 唐寅生, 超高压电网感性无功功率补偿设计方法, 电网技术, 1996.4(20.4).
- [7] 魏东, 特高压可控电抗器模型在沈变集团研制成功, 电力系统装备, 2005, 10.
- [8] 陈伯超著, 新型可控饱和电抗器理论及应用, 武汉水利电力大学出版社, 1999, 10 第一版.