基于分级分区的地区电网无功电压闭环控制系统

胡金双[1], 吴文传[1], 张伯明[1], 孙宏斌[1], 李民[2], 高雪生[2], 陈伯胜[2]

(1.清华大学电机系,北京 100084; 2.镇江供电公司,江苏 镇江 212001)

摘要: 采用两级无功电压控制策略相结合的体系实现无功电压闭环控制。"区域级"无功电压控制将电网划分为若干具有辐射状结构的无功电压控制区域,以各分区为单位,采用等值递推和最优匹配注入流算法的交叉迭代方法来实现。"厂站级"无功电压控制利用改进的九区图法实现,并在"区域级"无功电压控制策略无法实施时启动。现场控制实例和仿真算例表明,算法实用、鲁棒性好,形成的控制策略合理有效,优化控制效果明显。

关键词: 无功电压优化; 闭环控制; 最优匹配注入流

中图分类号: TM761; TM714.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2005)01-0050-07

0 引言

地区电网无功电压控制的控制手段主要是电容器的投切,有载变压器分接头档位的调整等。这些设备每天的操作次数和两次操作之间的时间间隔有限制,在数学上通常用一个有约束的非线性优化问题来描述。

上述问题的求解方法有两类,一类是基于潮流计算的方法。有三大类: ①数学规划法,主要有分枝定界[1]、动态规划[2]等。这类方法存在的主要问题是随着电网规模的扩大,计算量急剧增加。若结合一些启发式规则和灵敏度分析,效果可以得到一定改善。②人工智能法,主要有遗传算法[3],模拟退火法[4,5]和 Tabu 搜索[5]。这类算法计算速度通常很慢不适合实时调度应用。③数学规划与智能方法的结合。以上这些算法在现场应用时都需要依赖状态估计。如果状态估计运行异常,可能导致优化结果不可用,直接应用于闭环控制很困难。

另一类方法不依赖潮流计算,目前应用较多。主要有两种应用: ①"厂站级"无功电压控制,如目前在我国地区电网中广泛使用的厂站 VQC 装置,这种装置需要的所有信息来自本厂站,优点是运行可靠,但在控制策略、运行方式和闭锁等方面也存在问题[6]; ②考虑厂站之间协调的"区域级"无功电压控制,该法控制效果好,是近年来无功电压优化控制研究的热点[7]。

本文开发的地区电网无功电压优化闭环控制系统(AVC),充分结合了这两类方法,利用地区电网分片辐射供电特点实现分区、分级协调、等值递推的实时优化控制。该方法利用 EMS 中建立的电网模型和 SCADA 的实时数据,将地区电网划分为以 220 kV 厂站为"根节点"的若干辐射状无功电压控制区域,按区域实现网损最小的无功电压控制。另一方面,改进传统九区图方法,实现"厂站级"无功电压控制,在不具备进行"区域级"无功电压控制条件时使用,保证控制的鲁棒性。

1 我国地区电网的运行特点

1) 220 kV 及以上省级电网通常以环网方式运行,地区电网通常以辐射状方式运行。

2) 以 220 kV 变电站为电源点,为下面若干个 110 kV/35 kV 变电站供电,形成分区、分片供电的网架结构。这种电网结构自然形成了无功电压控制的分区,有利于无功电压的分区控制。

3) 控制目标中,对母线电压合格率和主变一次绕组的功率因数合格率的考核比较严格,系统网损则次之。

4) 作为控制手段的设备,电容器和主变有载调节分接头,每天操作次数和两次操作之间的间隔时间都有限制。

2 "区域级"无功电压控制

国内现阶段自动化系统的条件还很难保证 EMS 随时提供可靠的潮流解。完全基于潮流的实时闭环控制难度较大。本文根据地区电网的特点,提出实用的"区域级"无功电压控制方案。利用无功电压的局部性特性,以 220 kV 厂站为"根节点",向下一级搜索辐射状供电区域,按区域分别独立进行无功电压的优化控制,这可减少区域之间实时数据和通道问题的相互影响。

2.1　无功电压控制的动态分区

为叙述方便,我们先定义控制单元概念。如果以厂站中的主变为中心,将它和它的每个绕组出口的部分电网一起定义为无功电压控制的一个"控制单元",则一个厂站可能是一个控制单元(两台变压器并列运行),也可能是多个控制单元(两台变压器解列运行)。把 220 kV 厂站的控制单元作为其所供电的 110 kV/35 kV 厂站的控制单元的上层单元,其所供电的 110 kV/35 kV 厂站的控制单元为下层节点,组成无功电压控制区域,区域中控制单元具有上下层的父子关系。我们以区域为单位进行无功电压控制并用网络拓扑程序来确定控制单元和分区。

形成动态分区的算法是:由串联支路(线路、绕组等)和并联支路(电容器、负荷等)与节点(母线)之间的原始关联关系,由 220 kV 母线出发,通过广度优先搜索算法,建立每个控制区域的倒树状拓扑关系,这种拓扑关系采用双向链表存储,便于上下遍历。再以控制单元为单位,通过深度优先搜索算法,建立控制单元的上下层层次关系。其拓扑搜索过程如图 1 所示。

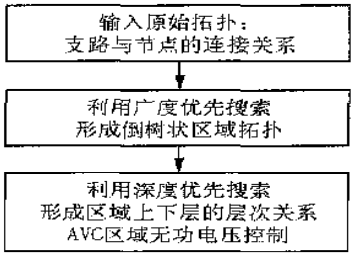


图 1　AVC 拓扑搜索过程

Fig. 1　Process of topology formation for AVC system

2.2　主变的有载分接头档位的确定

2.2.1　辐射状电网的电压调整等值递推公式

对于图 2 所示的简单支路图,支路 i 发端电压和发出功率(V_s、S_s)与其受端电压和发出功率(V_r、S_r)的递推公式(1)、(2):

$$S_s = S_r = (R_i + jX_i)\frac{|S_r|^2}{|V_r|^2} \tag{1}$$

$$|V_s| = \sqrt{|V_r|^2 + 2(P_r R_i + Q_r X_i) + \frac{(P_r^2 + Q_r^2)(R_i^2 + X_i^2)}{|V_r|^2}} \tag{2}$$

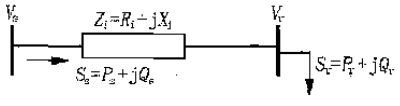


图 2　简单支路图

Fig. 2　A simple branch

对图 3 所示某地区的一个区域电网中,利用公式(1)、(2)可以建立辐射状供电区域中主变分接头档位调整的等值递推算法。

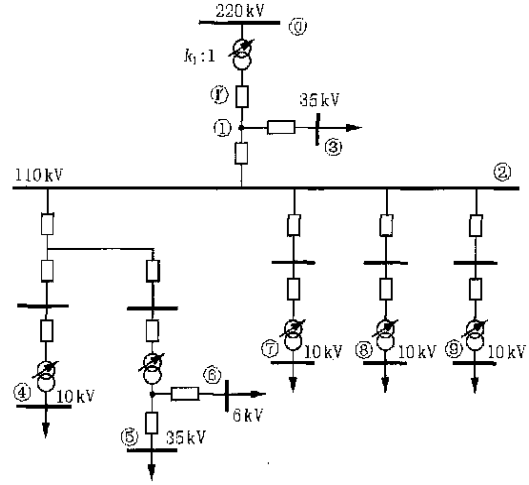


图 3　一个辐射状供电网络

Fig. 3　A radial power grid

图 3 中,1 个 220 kV 厂站下接了 5 个 110 kV 变电站,其中母线 ④、⑦、⑧和 ⑨为电压考核母线。本文从终端母线(③～⑨)出发,使这些母线的电压在合格范围,逐级往上推算,得到各终端母线对其上一级母线的电压变化范围的要求,取这些变化范围的公共部分,即可得到上一级母线的允许电压变化范围,据此确定主变分接头的档位。

以确定图 3 中 220 kV 主变高压侧绕组的档位 k1 为例,等值递推过程如下:

(1)　$i = n$, n 为终端母线(图 3 中的 ③～⑨)。

(2)受端 r = i,已知受端负荷 S_r 和电压变化范围 V_r^{max} 和 V_r^{min},利用式(1)和(2)计算节点 i 所在支路发端 s = i - 1 的负荷 S_s 和电压变化范围 V_s^{max} 和 V_s^{min},从受端到发端依次计算,将下一级支路功率累加得到上一级支路的功率,几条下一级支路计算得到的父节点电压的允许变化范围取公共部分。

(3)若 i - 1 不等于 1′,则 $i = i$ - 1 转入步骤(1);否则,转(4)。

(4)取求得的节点 1 的电压变化范围 V_s^{max} 和 V_s^{min} 的算术平均值 V_s^{avr}。假定根节点 0 的电压保持不变,其值是 V_0,依此选择一个与其最接近的分接头档位。

2.3　区域内电容器优化投切

2.3.1　辐射状电网的无功补偿匹配注入流法

根据文献[8],定义道路阵 T($n \times b$, $n+1$ 为节点数, b 为支路数)。如果支路 j 是连支则 $T_{ij} = 0$;若

支路 j 是树支,并且支路 j 在节点 i 到根节点的道路上,则 $T_{ij}=\pm1$,否则 $T_{ij}=0$。其中,若支路 j 与道路的方向相同时取正值,否则取负值。

由于区内电网是辐射状的,支路电流 f_b 和注入电流 g 的关系可以表示为:

$$f_b = T^T g \tag{3}$$

电容器的投入相当于节点上无功注入有一个增量 Δg,并引起支路电流 f 变化,变化后电网的有功网损 P_{loss} 为

$$P_{loss} = \sum_{i=1}^{b} R_{bi} \mid f_{bi}^{0} + \sum_{j=1}^{m} T_{ij}^{T} \Delta g_j \mid^2 \tag{4}$$

其中: R_{bi} 是支路 i 的电阻,f_{bi}^{0} 是支路 i 的基态电流,m 是装了电容器的节点总数,Δg_j 是节点 j 的注入电流变化量。

根据文献[9],求取合适的 Δg 使式(4)的 P_{loss} 取极小值。忽略无功变化引起节点电压相角的变化,求解这样一个优化问题,可以得到节点上的最佳无功注入补偿量,叫最优匹配注入流。文献[9]给出了一种迭代算法,可以快速计算出最优匹配注入流和最优补偿无功。

2.3.2 基于最优匹配注入流的电容器分区最优投切

本文"区域级"无功电压控制的目标是控制分区内网损最低,所以本文分别对各分区进行优化。由于分区内的电网是以 220 kV 母线为根节点的辐射电网,所以可以把 220 kV 母线作为松驰节点,其电压保持不变,采用前推、回推法计算分区潮流。在此基础上,采用无功补偿匹配注入流确定每个分区的电容器的投切容量,其基本算法见文献[9]。

2.4 "区域级"无功电压控制原理

本文"区域级"无功电压控制是基于等值递推和最优匹配注入流算法两者的交叉迭代方法实现的。对于各控制分区,交替进行分接头的调整和无功优化补偿,直到该分区达到优化运行状态。其迭代流程如图 4 所示。

图 4 中,从动态形成的若干控制分区中选择一个,进行区域级无功电压控制,调整分接头以消除电压越限,投切电容器以降低网损,交叉迭代此过程,最终形成该分区的控制策略。

2.5 "区域级"无功电压控制仿真算例

本文以图 3 所示区域电网为例,说明上述交叉迭代算法。在某实时断面下,优化前,其 220 kV 主变分接头档位 2 档,考核母线所在 110 kV 厂站运行状态如表 1 所示。系统网损为 0.372 161 MW。

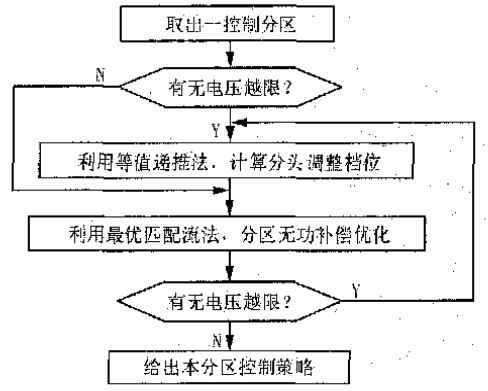


图 4 区域控制交叉迭代控制过程

Fig. 4 Flow chart of alternate iteration process for regional-level control

表 1 中,档位 5/(1～7)表示当前档位为 5 档,档位范围为 1 到 7 档,其余类推。表 1 说明,在此实时断面下,尽管各考核母线其本所的分接头档位均处于较低档位,按理此时各考核母线电压应该较高,但此时电压普遍偏低,这与该区域 110 kV 主网的系统电压水平和区域内的无功潮流分布有关。

表 1 实时运行状态

Tab. 1 Real-time state of power grid

考核母线	④	⑦	⑧	⑨
本所分接头档位	5/(1～7)	11/(1～17)	4/(1～7)	5/(1～7)
母线电压/kV	10.248 6	10.119 2	10.063 0	10.224 6
负荷功率/MVA	12.060 2 +j2.246 3	7.459 4 +j0.882 0	8.26 -j2.24	12.770 8 +j5.084 4
电容器容量(单台)/MVAR	2.4	3.6	1.2	3.0
电容器总台数	2	1	1	2
电容器当前运行状态	两台均切	切除	投入	两台均切

按上述等值递推和最优匹配注入流算法的交叉迭代计算,进行区域内无功电压优化控制。经过两次迭代,计算过程即收敛,得到的控制策略如下。

1) 分头调整:220 kV 主变分接头由 2 档升为 3 档,其余 110 kV 主变档位调整如表 2 所示。

表 2 110 kV 主变档位调整量

Tab. 2 Regulations of 110 kV OLTC

考核母线	④	⑦	⑧	⑨
本所 LTC 档位	5→4	11→9	不变	5→4

2) 电容器投切:各电容器的优化投切迭代过程如表 3 所示。

表 3 中,Q_{opt} 表示某次迭代过程的最优补偿容量,CP_{opt} 表示由此计算得到的投切电容器台数,$CP_{opt}>0$ 表示投入,$CP_{opt}=0$ 表示不投切,$CP_{opt}<0$ 表示切除。

表 3　电容器优化投切迭代过程

Tab. 3　Iterative process for capacitor optimization

节点	迭代次数			
	第 1 次		第 2 次	
	Q_{opt}/ MVAR	CP_{opt}/ 台	Q_{opt}/ MVAR	CP_{opt}/ 台
④	2.568 0	1	0.514 2	0
⑦	1.983 0	0	1.954 7	0
⑧	- 1.149 3	- 1	0.091 4	0
⑨	6.164 5	2	1.039 1	0

根据上述控制策略,用潮流计算进行仿真评估。所得考核母线电压的仿真值如表 4 所示,和表 1 中调整前的电压值相比,电压普遍有所提高;优化后系统网损为 0.350 615 MW,比优化前的网损下降了 0.021 55 MW (5.79 %)。

表 4　考核母线电压仿真值

Tab. 4　Simulative results of bus voltage

考核母线	④	⑦	⑧	⑨
母线电压 / kV	10.420 2	10.269 4	10.189 7	10.458 3

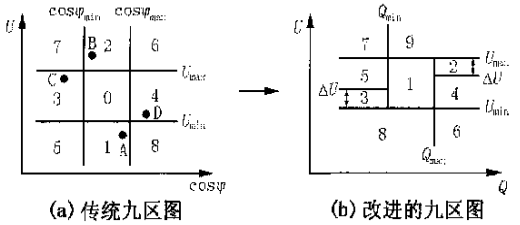
3　“厂站级”无功电压控制原理

实际运行过程中,由于实时数据质量不好或通道故障,实时潮流结果可能并不可用。这时转入采用“厂站级”无功电压控制策略,由于它只利用局部信息,因此运行可靠,可以确保实时数据完好的厂站单独参与优化控制。

本文采用改进的九区图方法,实现“厂站级”无功电压控制。

厂站 VQC 的控制原理是基于传统的九区图,如图 5(a) 所示。图中 U 为厂站二次侧母线的电压,cos φ 和 Q 分别为变压器高压侧绕组的功率因数和无功。文献[10]指出该图中处于边界附近的运行点,如 A、B、C 和 D 点,有可能发生操作振荡现象。同时,仅采用 cosφ 或 Q 固定的上下限值也不能全面反映无功功率的大小和方向。

本文从分区划分方案、无功功率或功率因数的限值和控制策略三个方面对图 5(a) 的传统九区图进行改进。介绍如下。



(a) 传统九区图　(b) 改进的九区图

图 5　传统九区图的改进

Fig. 5　Revised conventional nine-area-graph

3.1　九区图的改进

1) 分区划分方案。用无功功率 Q 上下限替代传统九区图的功率因数 cos φ 上下限。由于传统九区图的 2 区与 7 区、1 区与 8 区的动作策略是完全一样的,所以把他们分别合并成对应图 5(b) 中的 9 区和 8 区。另外,为了防止电容器投切振荡,将 3 区中靠近 U_{max}、4 区中靠近 U_{min}的运行点分离出来,分别作为一个单独的区域。重新编号后的改进九区图如图 5(b) 所示,图中ΔU_+为投电容器引起的电压变化量,ΔU_-为切电容器引起的电压变化量。

2) 由于九区图中 Q 的上下限值和电网运行状态有关,我们根据电网实时运行状态动态确定九区图中待求的 Q 的上下限值 Q_{min}和 Q_{max}。然后根据 Q_{min}和 Q_{max}判断是否该切投电容器。

无功 Q 小于 Q_{min}时系统切电容器,Q_{min}考虑如下两种情况:

①若出现无功倒送,则切电容器;

②若无功正送,则考察切除电容器后,功率因数是否仍大于用户设定的功率因数下限(为防止操作振荡,再加上一个裕度($\Delta\delta$),是则认为可切,否则认为不可切,即

$$\frac{P_L}{\sqrt{P_L^2+(Q_{min}+Q_C)^2}} \geq \cos(\varphi_{min}+\Delta\delta) \Rightarrow Q_{min} \leq \frac{\sqrt{1-(\cos\varphi_{min}+\Delta\delta)^2}}{\cos\varphi_{min}+\Delta\delta}P_L - Q_c \tag{5}$$

式中:Q_c 为电容器的额定容量,P_L 为实时有功功率,cos φ_{min}为用户设定的功率因数下限,$\Delta\delta$一般取 0.025。

当无功 Q 大于 Q_{max}时系统投电容器。Q_{max}按如下原则确定:

①一方面保证功率因数合格,根据当前负荷的实时有功功率和用户设定的功率因数下限,按如下公式计算得到一个无功量的上界:

$$\frac{P_L}{\sqrt{P_L^2+Q_{max}^2}} \geq \cos\varphi_{min} \Rightarrow Q'_{max} = \frac{\sqrt{1-\cos^2\varphi_{min}}}{\cos\varphi_{min}}P_L \tag{6}$$

②另一方面为防止大量无功倒送,根据电容器的额定容量,乘以一个系数 $k(0.9 < k < 1.0)$,得到另一个无功量的上界:

$$Q''_{max} = K \cdot Q_c \tag{7}$$

③取两者中最大的作为九区图用的无功量的上界:

$$Q_{max} = \max(Q'_{max}, Q''_{max}) \tag{8}$$

3) 根据上述分区的划分和限值,控制策略如表5所示。

表5 改进九区图的控制策略

Tab.5 Control scheme for revised nine-area-graph

分区	制定的控制策略
1、2、3	不动作区
4	投电容
5	切电容
6	投电容,若无电容器可投,升分头
7	切电容,若无电容器可切,降分头
8	升分头
9	降分头

3.2 “厂站级”无功电压控制实例

基于改进的九区图原理,我们的AVC系统实现了“厂站级”无功电压控制。该模块的现场控制实例表明,绝大部分情况下,经过一次控制,能从不合格分区到达合格的1分区或者可以不动作的2和3分区,在极少情况下(负荷发生突变),需要经过二次控制(如切除两台电容器或分接头顺调两档),才能达到上述分区,但没有出现振荡调整的情况。

表6为从各个不合格分区(4～9)到合格分区1的典型控制实例。

表6 “厂站级”无功电压控制实例

Tab.6 Reactive power voltage results of station-level control

实例	控前状态 P/MW	控前状态 Q/Mvar	控前状态 U/kV	控前分区	控制策略	控后状态 P/MW	控后状态 Q/Mvar	控后状态 U/kV	控后分区
1	7.029	3.267	10.100	4	投电容器	7.161	1.221	10.190	1
2	6.028	-1.407	10.699	7	切电容器	6.296	0.000	10.594	5
	6.296	0.000	10.594	5	切电容器	6.564	1.741	10.465	1
3	8.305	3.215	10.040	6	投电容器	8.239	1.306	10.324	1
4	10.717	2.110	10.040	8	升档	10.013	1.005	10.341	1
5	11.052	1.808	10.676	9	降档	10.918	2.11	10.412	1

以控制实例3可以说明本文对传统九区图的改进。设传统九区图cosφ上下限分别为0.98和0.95,则当 P = 8.305 MW时,cos φ上下限所对应的 Q 上下限之差为1.0433 Mvar,小于电容器的额定容量(2.0 Mvar);这样在VQC控制下,实例3在控前运行点处于5区,按其控制策略投入电容器后,运行点处于4区,而按4区的控制策略切电容器,则控后运行点又回到5区,这样就发生了由于 Q 上下限值与电容器额定容量不匹配而引起的操作振荡。

采用改进九区图的控制原理,实例3按控制前所在分区的控制策略投入电容器后,在 P = 8.239 MW和电容器额定容量为2.0 Mvar的情况下,按上述公式(8),其 Q_{max} 值为2.708 Mvar,因此控后运行点处于1区,不再进行操作,这样就避免了上述操作振荡的发生。

对其他控制实例的分析,也可得到类似的结论。可见,本文对传统九区图的改进是有效和可行的。

4 “区域级”与“厂站级”控制的分级协调

本系统采用“区域级”与“厂站级”无功电压控制相结合的方式实现,确保系统持续起作用。即对每个控制分区,先进行区域级控制分析计算,若可以在区域级进行调整时,则调整之。而对于不具备区域级控制条件的厂站(如远动信息不佳),则采用厂站级无功电压控制。两级配合优化控制流程如图6所示。

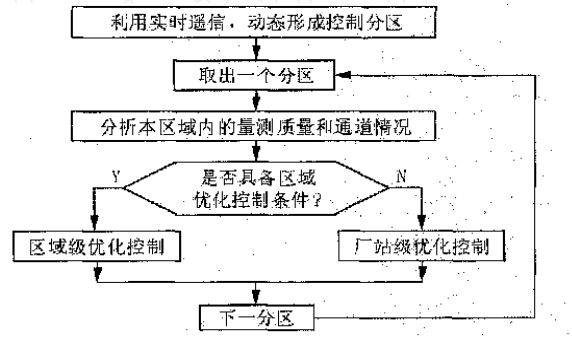


图6 两级配合优化控制流程

Fig.6 Flow chart of hierarchical cooperation optimization control

本文厂站级控制处于辅助地位,图6中,针对某个控制分区,根据其运行条件,若具备以区域为单位进行控制,则采用区域级控制,否则仅对区域中具备条件的某些厂站采用厂站级控制。

5 闭环控制的其他问题

5.1 异常与闭锁

闭环控制系统的成功运行,需要及时、正确地判别电网和计算机网络系统中出现的异常情况,并实施可靠快速闭锁和解锁。AVC系统将异常分为系统级、厂站级和设备级三类。

1) 系统级异常

发生此类异常,AVC将自动休眠,闭锁整套系统,不再进行无功电压优化计算和闭环控制,向用户发出告警,直到异常解除。此类异常有:AVC系统与数据库、SCADA/EMS网络连接中断。

2) 厂站级异常

发生此类异常,AVC闭锁发生异常的厂站,不再对其进行优化控制。此类异常有:厂站远动退出。

3) 设备级异常

发生设备级异常,AVC 闭锁发生异常的设备,不再对其进行优化控制。此类异常有:母线 PT 断线、电压异常、电压长时间不变;主变和电容器保护动作;主变功率越限;电容器开关或主变分接开关日动作次数达到最大值,或操作小于最小时间间隔;电容器开关或主变分接开关拒动,主变滑档等。

5.2　启动周期

本系统启动的周期可以人工指定。也可以不同时段设定不同的周期。对于负荷变化较快的时段,如早上 6 到 8 点和晚上 8 到 10 点等时段,采用短周期,一般为 2 分钟;而对于负荷变化较慢的时段,采用长周期,一般为 15 分钟。

5.3　与厂站端 VQC 的配合

对于接入到本文 AVC 系统进行控制的厂站,由人工停用该厂站的 VQC。反之,当该厂站退出本文 AVC 系统控制后,由人工启用该厂站 VQC。

6　系统体系结构与系统生成

作为电网分析计算软件,AVC 系统需要电网拓扑、设备电气参数和实时运行数据等三类数据;同时,作为闭环控制软件,还需要处理电网运行中出现的各种异常信息以及发送控制命令。AVC 系统主要由模型维护工具、无功电压综合分析计算模块、命令执行模块以及结果显示模块组成,其体系结构如图 7 所示。

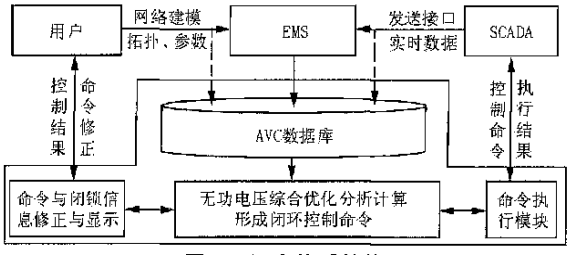


图 7　AVC 体系结构

Fig. 7　Architecture of AVC system

其中,模型维护工具(与 EMS 图模工具集成)是 AVC 系统的基础,可以从 SCADA/ EMS 中导入电网拓扑和设备电气参数,并进行修正。无功电压综合分析计算模块是 AVC 系统的核心,接收 SCADA 实时数据和异常事件信息,动态形成控制分区,根据区域电压控制策略,以分区为单位进行无功电压综合优化分析计算,形成控制命令。命令执行模块将形成的控制命令转发给 SCADA,实现对设备的闭环控制,并记录命令执行结果。结果显示模块将当前的闭锁信息和形成的控制命令信息提供给用户,使得用户可以人工解除相应闭锁,以及根据运行经验对控制命令进行修正。

AVC 系统可以运行在调度中心或集控中心。在现场完成软件安装后,用户可以根据实际情况,将电网中厂站逐个由 SCADA/ EMS 导入到 AVC 系统。并按先开环后闭环的原则,在新增厂站开环运行过程中,由用户根据运行经验对 AVC 形成的控制策略进行校核,条件成熟后转入闭环运行。

7　现场应用情况

AVC 系统已在某地区电网投入运行,运行在集控中心。其中"厂站级"无功电压控制模块取代厂站 VQC 装置,实现对全网 12 个厂站的无功电压综合优化闭环控制。据现场统计,2004 年 2 月份,受控厂站的母线电压合格率和主变绕组功率因数合格率最高均为 100 %,最低分别为 99. 31 %和 98. 96 %;和原来的 VQC 控制相比,电容器和分接头的总动作次数只是原来的 58. 8 %和 59. 3 %,由此可见 AVC 具有较好的优化控制效果,"区域级"无功电压控制模块也给用户提供了很好的无功电压控制参考,待现场条件具备后转为闭环运行。

8　结论

采用分级协调的无功电压控制模型和算法,分区域进行控制,是地区电网无功电压闭环控制的发展趋势。本文开发的地区电网无功电压优化闭环控制系统(AVC)可以基于 SCADA/ EMS 自动生成,同时还具有可以人工修改的灵活性;算法以区域为单位,实现全网无功电压综合优化分析计算,控制范围与模式选择灵活,安全机制符合实际;现场运行情况表明,AVC 系统程序运行稳定可靠,形成的控制策略合理有效,能显著降低地区电网无功电压控制的成本,提高母线电压和变压器绕组功率因数合格率,具有明显的优化控制效果。

参考文献:

[1] Wang S C, Liao W B, Shen K Y, et al. Branch-and-bound Dispatching for Feeder Capacitors on Distribution System[A]. Power Con. Australia: 2000. 1569-1573.

[2] Hsu Y Y, Kuo H C. Dispatch of Capacitors on Distribution System Using Dynamic Programming[J]. IEE Proc - C, 1993, 140(6): 433-438.

[3] Ghose T, Goswami S K, Basu S K. Solving Capacitor Placement Problems in Distribution System Using Genetic Algorithms[J]. Electric Machines and Power Systems, 1999, 27:

429-441.

[4] Chiang H D, Wang J C, et al. Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems, Part I: A New Formulation and the Overall Problem[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2):634-642.

[5] Chiang H D, Wang J C, et al. Optimal Capacitor Placement in Distribution Systems, Part II: Solution Algorithms and Numerical Results[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1990, 5(2):643-649.

[6] 严浩军. 变电站无功电压综合自动控制问题探讨[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 41-43.
YAN Hao-jun. Some Problems on Integrated Control for Voltage and Reactive Power in Substation[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 41-43.

[7] 丁晓群,陈晟,许杏桃,等. 全网无功电压优化集中控制系统在泰州电网的应用[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 21-23.
DING Xiao-qun, CHEN Cheng, XU Xing-tao, et al. Appliation of Optimization and Centralized Control System for Reactive Power/Voltage in Taizhou Power Network[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 21-23.

[8] 张伯明,相年德. 电网计算中的广义网络流的回路分析及其在线应用(I)——理论和方法[J]. 清华大学学报, 1986, 26(4):76-85.
ZHANG Bo-ming, XIANG Nian-de. The Loop Analysis Theorem of General Network Flow and Its Application in Real-time Computation(I) —— Theorem and Algorithm[J]. Journal of Tsinghua University, 1986, 26(4):76-85.

[9] 吴文传,张伯明. 电容器实时优化投切的最优匹配注入流法[J]. 电机工程学报, 2004, 24(1):35-39.
WU Wen-chuan, ZHANG Bo-ming. Optimal Matching Injected Flow for Optimal Sizing of Capacitor[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(1):35-39.

[10] 赵登福,等. 新型变电站电压无功综合控制装置的研制[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 14-17.
ZHAO Deng-fu, et al. Research of a New Integrated Control Set for Voltage and Reactive Power in Substation[J]. Power System Technology, 2000, 24(6): 14-17.

收稿日期: 2004-05-10; **修回日期**: 2004-06-14

作者简介:

胡金双(1974-),男,硕士研究生,研究方向为无功电压控制;E-mail: hujinshuang@tsinghua.org.cn

吴文传(1973-),男,讲师,博士,主要从事 SCADA、EMS、DTS 和 DMS 的研究和开发工作;

张伯明(1948-),男,教授,博士生导师,主要从事电力系统分析和调度自动化的科研和教学工作。

A reactive power/voltage closed loop control system for regional power grid based on hierarchical level and decomposed zone

HU Jin-shuang[1], WU Wen-chuan[1], ZHANG Bo-ming[1], SUN Hong-bin[1], LI Min[2], GAO Xue-sheng[2], CHEN Bo-sheng[2]

(1. Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Zhenjiang Power Supply Company, Zhenjiang 212001, China)

Abstract: A practical reactive power/voltage closed loop control system for regional power grid is investigated. Two-level hierarchy is adopted in the control system. Firstly, the whole regional power grid is decomposed into several control zones with radial network configuration. Based on an algorithm by alternate iterations between both the recursive equivalence and the optimal matching injection flow, the regional-level control strategy is realized. Secondly, based on an improved "nine-area-graph" control strategy, substation-level control is implemented, which is started up once the regional-level control does not work normally. The control system presented in this paper has been put into practical operation and the results show that this system is robust and effective.

Key words: reactive power/voltage optimization; closed loop control; optimal matching injection flow

(上接第 45 页 continued from page 45)

A probe into the technology of relay protection and control on network

LIU Chao-zhang[1], JIANG Yun[1], FAN Yun-peng[1], PAN Zhen-cun[2]

(1. Dezhou Power Supply Corporation, Dezhou 253008, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: This paper firstly introduces the present status of electric power relay protection, then introduces the concept of the technology of relay protection and control on network, the constitution of the system and the running model of system server. It points out the prospect of the proposed technology, and analyses the probability, advantage and the facing difficulty in its developing. This paper brings forward the data running model, whose data acquisition is local, transmission digitalized and synthesized and the software packet running model, which is flexible, perfect, adaptive and intelligentized.

Key words: relay protection; intelligent control; network