

考虑电网谐波影响的电容器投切研究

郝福忠, 赵 锋, 李晋城, 崔红梅

(河南省电力公司济源供电公司, 河南 济源 454650)

摘要: 针对电网电容器的投切会影响谐波在电网中的传播, 甚至会引起谐波的放大和谐振的问题, 提出了在谐波影响下, 计及电容器投切代价的电网电容器优化投切控制模型以及电容器临界补偿容量的算法。该模型能有效地控制设备动作次数, 并避免电容器投切过程中的谐振现象。提出了一种基于遗传算法和禁忌搜索算法相结合的混合算法, 该算法能加快收敛速度, 减少随机解的影响。用混合算法对一个 18 节点配电网实例进行仿真, 结果表明该模型符合实际, 提出的策略和方法具有较好的实时性和实用性。

关键词: 电容器投切; 谐波; 遗传算法; 禁忌搜索算法

Research of capacitor switching considering harmonic influence

HAO Fu-zhong, ZHAO Feng, LI Jin-cheng, CUI Hong-mei

(Jiyuan Power Supply Company, Electric Power of Henan, Jiyuan 454650, China)

Abstract: Power capacitor switching affects the harmonics spread in the grid, and even leads to the harmonic amplification and harmonic resonance. For this problem, we propose the capacitor optimal switching control model which accounts the cost of capacitor switching as well as the algorithm of the capacitor critical compensation capacity under the influence of the harmonics. The model can effectively control the action times of the devices and avoid the resonance phenomenon during the capacitor switching process. This paper proposes a mixed algorithm based on genetic algorithm and TS algorithm, which can speed up the convergence velocity and reduce the influence of stochastic results. Finally, an 18-bus distribution network is simulated based on the mixed algorithm, and the simulation results prove that the proposed model is realistic. The strategy and the algorithm proposed have good real-time ability and practicality.

Key words: capacitor switching; harmonics; genetic algorithm; TS algorithm

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)04-0079-05

0 引言

目前在我国的各级电网中均安装了相当数量的无功补偿装置, 以确保供电质量和电网安全经济运行^[1]。在电网中安装并联电容器等无功补偿装置, 可就地补偿感性负载所消耗的无功功率, 降低线路和变压器因输送无功功率造成的电能损耗^[2], 具有投资少、回报高、见效快、运行维护方便等特点, 但同时它又是对谐波敏感而先受损害的元件, 电容器组既可能吸收谐波, 改善电能质量, 又可能放大谐波, 使电压质量下降。

目前实际系统中有许多并联电容器由于设计时仅从补偿系统无功的角度选定电容器的参数, 结果往往会在随负荷变化而分组投切电容器的过程中发生谐波谐振, 使谐波电流和电压放大几倍甚至数十倍, 施加到电容器、互感器、断路器等设备上,

引起高压电气设备绝缘损坏^[3]。甚至破坏系统的正常运行, 这种情况已经多次发生, 必须引起注意。

目前电网中用于无功补偿的并联电容器有的未串联电抗器、有的采用小电抗率抑制合闸涌流、有的串联 6% 的电抗器, 以抑制 5 次谐波, 但同时又容易引发 3 次谐波的谐振。针对这种问题, 有学者提出了串联不同电抗率的电容来抑制谐波, 这种方式是在明确了电网中谐波详细参数的前提下才能使用, 而且一般要编制投切顺序, 通常电网中的谐波变动频繁, 谐波的具体数据很难获得; 而且过高的电抗率, 也会使电容器的端电压增高, 同时这种方式也给供电部门的管理和维护带来不便^[4], 所以不宜采用不同电抗率混装的方式。另外, 除非电网中谐波污染很严重, 一般不考虑加装滤波器, 因为不仅会增加投资, 而且滤波器本身也会导致谐波问题。所以, 在电网有轻度谐波污染时, 应该是在尽量不

增加或少增加投资的前提下，改变现有无功补偿装置的运行方式和分组情况，防止谐波进一步放大导致的烧坏设备或电容器不能正常投运的情况出现。

目前针对无功补偿设备优化运行的研究已经比较成熟，但是考虑谐波因素的研究还相对比较少^[5-8]，本文在分析电容器对谐波放大原理的基础上，提出了无功临界补偿容量的算法，通过对电网中现有电容器进行重新规划和分组，合理确定电容器的容量，使电容器在运行中既能避免谐波放大，又能起到无功补偿的作用。最后，文中采用遗传禁忌算法对一个配电网进行了仿真，表明了该方法的有效性及其实用性。

1 电容器临界补偿容量的确定

图 1 是单组电容器与系统的等值电路图，图中 I_n 为 n 次谐波电流， I_{sn} 为进入系统的谐波电流， I_{cn} 为电容器支路谐波电流， X_{cn} 、 X_{kn} 、 X_{sn} 分别为电容器、电抗器和系统在 n 次谐波下的电抗，在基波下分别为 X_c 、 X_k 、 X_s 。

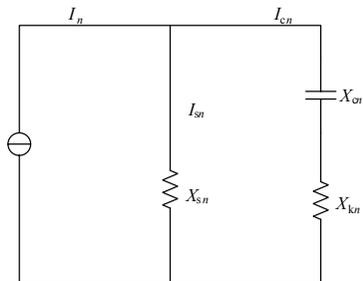


图 1 电容器投入后系统谐波等值电路图

Fig.1 Equivalent circuit of power system harmonics after capacitors is closed

由图 1 可以导出电容器和主系统的电流关系，如式 (1)、(2)：

$$I_{cn} = \frac{nX_s}{nX_s + nX_k - X_c/n} I_n = \sigma_{cn} I_n \quad (1)$$

$$I_{sn} = \frac{nX_k - X_c/n}{nX_s + nX_k - X_c/n} I_n = \sigma_{sn} I_n \quad (2)$$

σ_{cn} 和 σ_{sn} 为谐波电流在电容器和主系统的放大系数，当 $|\sigma_{cn}| > 1$ 时，电容器谐波电流放大，当 $|\sigma_{sn}| > 1$ 时，系统谐波电流放大，当两者都大于 1 时，谐波电流严重放大。

令 $s = \frac{X_s}{X_c} = \frac{Q_c}{S_k}$ ， $k = \frac{X_k}{X_c}$ ，其中 Q_c 为电容功率， S_k 为电容补偿处的短路容量，则有

$$\sigma_{cn} = \frac{s}{s + k - 1/n^2} \quad (3)$$

$$\sigma_{sn} = \frac{k - 1/n^2}{s + k - 1/n^2} \quad (4)$$

一般电容器不串联或串联一个很小的 k ($< 0.5\%$)^[8]来抑制合闸涌流，为避免进入系统的谐波电流被放大，同时考虑到电容器一定的承受谐波的能力，在电容器允许的过电流过电压等范围内，电容器可以吸收一部分谐波，以减少进入系统的谐波。因此要保证 $|\sigma_{sn}| < 1$ 。

对于 $k=0$ 的情况，可以由式 (4) 导出 $s > \frac{2}{n^2}$ ，

此时有 $Q_c > \frac{2}{n^2} S_k$ ；

当 k 不为零时，由于 k 较小，使 $k - 1/n^2 < 0$ ，所以有 $Q_c > -2S_k(k - 1/n^2)$ ；

对 $k - 1/n^2 > 0$ 的情况，此时的谐波次数较高， $Q_c > 0$ ；此时 σ_{cn} 和 σ_{sn} 都位于 0 到 1 之间，起到分流作用。

可以看出进入主系统的谐波电流与电容器的容量是成反比的，即在低次谐波下如果不发生系统谐波电流的放大，则在高次谐波下也不会发生放大，本文将 Q_c 称为电容器的临界补偿容量。

图 2 是在 3、5 次谐波下， s 与 σ_{cn} 、 σ_{sn} 的变化关系，其中红色为 5 次谐波，蓝色为 3 次谐波。可以看出在 3 次谐波下，当 $s > 0.2$ 时， $\sigma_{sn} < 1$ ， $\sigma_{cn} < 2$ ，此时进入系统的谐波电流减小，进入电容器的谐波电流也是随 s 递减的， σ_{cn} 最大为 2；5 次谐波的临界 s 值要比 3 次谐波的小，因此电容器的补偿容量应该按照低次谐波的 s 值来确定，从而避开谐振点。另外，考虑到谐波对线路分布参数的影响以及补偿点 S_k 的变化，实际应用中电容器的临界补偿容量 Q_c 可以乘以一个 1.1~1.3 的容量储备系数。

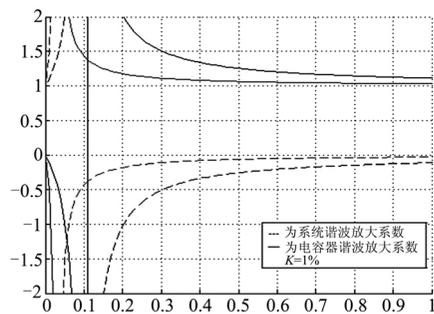


图 2 谐波电流随电容变化曲线

Fig.2 Response of harmonic currents to capacitors

2 电网电容器优化投切的数学模型

电网电容器的优化投切是基于现有的电容器配置和网络结构, 在已知优化周期内系统各节点负荷功率的前提下, 应用优化技术确定电容器的最佳投切策略, 以满足系统无功需求和电能质量要求的条件下, 达到电网的有功网损最小, 从而实现配电网的安全和经济运行。电网电容器的优化投切是一个多变量、多约束条件的非线性规划问题, 本文所建立的模型考虑电网损耗和投切次数, 其数学模型的目标函数表示为式 (5)。

$$\min f = P_L + C \sum_{i=1}^{NC} \Delta q_i \quad (5)$$

式中: P_L 为有功损耗; 第二项为电容器投切代价, Δq 为补偿节点处在优化前后两个时段电容器投入组数的变化量, NC 为补偿节点数, 其中 C 是以功率形式表示的投切代价系数, 这样将设备的投切以经济成本来衡量, 控制变量的变化过大会使目标函数增大, 优化结果将在降损量与投切代价之间达到平衡, 从而能够避免过多的投切次数。在实际应用中, 调节代价的计算不必苛求精确, 因为设备的使用寿命是概率期望值。

$$C = \frac{\text{设备成本}}{\text{设计动作次数} \times \text{电价} \times \text{优化间隔}} \quad (\text{kW/次})$$

模型的约束条件:

(1) 基波潮流约束

$$P_{Gi} = P_{Di} + V_i \sum_{j \in N} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \quad (6)$$

$$Q_{Gi} = Q_{Di} + V_i \sum_{j \in N} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij})$$

(2) 谐波潮流约束

$$I_h = Y_h U_h \quad (7)$$

式中: N 为系统节点数; V , θ 分别为基波电压幅值和相角; P_{Gi} , Q_{Gi} 分别为发电机有功和无功; P_{Di} , Q_{Di} 为负荷有功和无功; I_h , U_h , Y_h 分别为谐波电流、谐波电压、谐波导纳矩阵, h 为谐波次数。

(3) 电容器容量约束

传统的约束条件为

$$0 < q_j < q_{\max} \quad (8)$$

式中, q_j 和 q_{\max} 分别为节点 j 处可投切电容器的实际投入容量和总安装容量。

本文将临界补偿容量指导算法的进化过程, 将临界补偿容量 Q_c 引入约束条件, 如果 $q_j < Q_c$, 但没有发生电压越限, 则补偿量为 q_j ; 如果发生电压

畸变越限现象, 则加大距离谐波畸变越限点最近的上游补偿点 (谐波电流流入节点的方向) 的 q_j 至 Q_c , 即将补偿容量的下限定为 Q_c , 使 $Q_c < q_j < q_{\max}$, 重新搜索, 直至谐波电压畸变都处于规定范围内。

(4) 电压上下限约束

$$U_{\min} \leq \sqrt{U_{i1}^2 + \sum_{k=3}^h U_{ik}^2} \leq U_{\max} \quad (9)$$

式中: U_{i1} 和 U_{ih} 分别为节点 i 的基波电压和 h 次谐波电压; U_{\min} 和 U_{\max} 为电压上下限。

(5) 电压畸变约束

$$THD_i = \left(\frac{\sqrt{\sum_{k=3}^h U_{ik}^2}}{U_{i1}} \right) \times 100\% \leq THD_{\max} \quad (10)$$

式中, THD_i 和 THD_{\max} 分别为节点 i 的电压总谐波畸变率和最大限值。

对于模型中的约束条件, 潮流约束式 (6) 和式 (7) 以及电容器容量约束式 (8) 是必须要满足的, 对于不等式约束条件式 (9), 以软约束的方式处理, 即采用罚函数的方法将其计入目标函数。临界补偿容量是流入系统谐波电流放大和减小的分界点, 作为一个阈值, 是减小 THD 的一个必要条件, 对于提高到临界补偿容量后, 仍然出现的 THD 越限现象, 也将越限量作为惩罚项计入目标函数。

$$\begin{aligned} \min f = & P_L + C \sum_{i=1}^{NC} \Delta q_i + \sigma_{UL} \sum \max\{0, (U_L - U_i)\} + \\ & \sigma_{UU} \sum \max\{0, (U_i - U_U)\} + \\ & \sigma_{THD} \sum \max\{0, (THD_i - THD_{\max})\} \end{aligned} \quad (11)$$

式 (11) 中, σ_{UL} , σ_{UU} , σ_{THD} 分别为电压下限约束、电压上限约束和谐波电压畸变约束的惩罚系数, 各惩罚系数的选取可以根据经验和实际工作中对各约束条件的容许程度进行。

3 遗传禁忌算法

把 GA 和 TS 算法进行组合, 充分利用遗传算法全局寻优能力强和 TS 算法局部搜索能力好的优点, 形成了多样性和收敛性都较好的新算法。利用 TS 禁忌表构造新的交叉算子 (NC), 用 GA 的变异算子和 TS 算法组合, 构成新的变异算子 (NM)。

(1) NC 算子

NC 算子利用禁忌表来对交叉后的子代个体进行选择, 如果新个体的适应度大于上一代适应度的平均值, 并且该个体不在禁忌表中, 则新个体被接受, 取两个父代中的优秀个体进入下一代; 当新个体适应度小于上一代的适应度平均值, 但没有被禁忌时也被接受, 这样就保证了算法能接受一定的退化解, 有利于保持群体的多样性。

(2) NM 算子

NM 算子包括遗传算法的变异算子和 TS 算法, 如果变异产生的新个体优于父代, 则接受, 如果产生退化个体, 则利用 TS 算法对退化个体进行寻优, 产生新的优秀个体。

组合算法步骤如下:

(1) 输入原始数据, 包括网络参数、限值、禁忌表深度、最大迭代步数等, 并生成初始种群, 随机产生 N 个个体。

(2) 计算当前代群体中个体的适应度, 通过目标函数及各目标的权重对群体中的每个个体进行适应度计算。

(3) 进行选择交叉操作。

(4) 调用 NC 算子对新个体进行选择。

(5) 进行遗传变异操作。

(6) 调用 TS 算法对退化个体寻优, 返回一个新个体。

(7) 重复上述过程, 直至满足终止条件。

4 算例分析

本文对一配电网的电容器优化投切问题进行了研究, 网络结构如图 3。

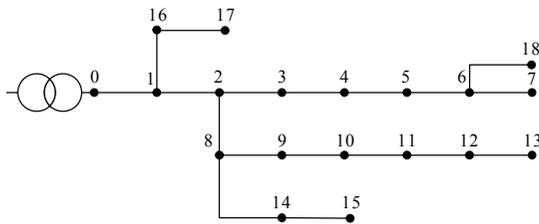


图 3 配电系统图

Fig.3 Distribution system diagram

网络中补偿节点为 3、7、12、15、16、18, 节点 12、15 为谐波源, 考虑的谐波次数为 3、5、7、11。

谐波电流注入情况如表 1。

表 2 是在不考虑谐波因素情况下的优化结果, 由表 3 对优化前后的 THD 做了比较, 由于受谐波的影响, 系统在没有补偿电容时各节点电压有畸变,

但都在国家规定的 4% 以下; 当补偿电容器后, 由于没有考虑到电容对谐波的放大, 导致几乎全部节点的 THD 超过 4%, 其中对 3 次和 7 次的放大较为严重, 因此补偿方案在有谐电网中并不适用。

表 1 注入系统的谐波电流

Tab.1 Harmonic currents injected into the system

节点	I_3 /pu	I_5 /pu	I_7 /pu	I_{11} /pu
12	0.02-0.015j	0.03-0.035j	0.03-0.02j	0.001j
15	0.01-0.01j	0.018-0.014j	0.013-0.01j	0.001

表 2 不考虑谐波因素时的运行方案

Tab.2 The operation scheme when harmonic is ignored

节点	3	7	12	15	16	18	总容量
补偿容量/kvar	360	290	1 610	850	760	540	4 410

表 3 不考虑谐波因素时的谐波电压和网损

Tab.3 The system loss and harmonic voltage when harmonic is ignored

节点	HD3%	HD5%	HD7%	HD11%	THD%	THD% (优化前)
1	1.003 6	0.920 5	1.499 3	0.018 7	4.2	3.63
2	1.025 0	0.940 4	1.530 8	0.019 2	4.29	3.75
3	1.022 9	0.938 3	1.527 9	0.019 1	4.28	3.74
4	1.021 2	0.936 7	1.525 6	0.019 1	4.27	3.74
5	1.018 8	0.934 5	1.522 5	0.019 0	4.26	3.73
6	1.017 4	0.933 1	1.520 4	0.019 0	4.26	3.72
7	1.016 1	0.931 9	1.518 7	0.019 0	4.25	3.72
8	1.033 7	0.948 5	1.543 5	0.019 3	4.32	3.79
9	1.041 5	0.956 2	1.555 9	0.019 4	4.36	3.84
10	1.049 5	0.964 3	1.568 8	0.019 6	4.39	3.88
11	1.057 2	0.972 0	1.581 1	0.019 7	4.43	3.92
12	1.053 5	0.968 4	1.575 9	0.019 6	4.41	3.91
13	1.053 4	0.968 3	1.575 8	0.019 6	4.41	3.91
14	1.039 3	0.953 5	1.550 7	0.019 4	4.34	3.82
15	1.038 1	0.952 5	1.549 2	0.019 4	4.34	3.81
16	1.001 4	0.918 4	1.496 3	0.018 7	4.19	3.62
17	1.001 1	0.918 1	1.495 9	0.018 7	4.19	3.62
18	1.016 7	0.932 4	1.519 5	0.019 0	4.25	3.72
网损	207.3 kW					348 kW

采用本文方法得到的优化结果在表 4 和表 5 中列出, 由优化结果看出, 各次谐波的畸变水平都有所下降, 各节点的 THD 都能控制在 4% 以下, 说明本文提出的方法能很好地抑制电容器对谐波的放

大, 网损降低量基本相当, 谐波源处的补偿容量都加大到临界补偿容量以上, 虽然补偿容量有增加, 但对电网的安全运行以及提高电能质量有重要意义。

表 4 节点补偿情况

Tab.4 Compensators of selected node

节点	3	7	12	15	16	18	总容量	网损/kW
补偿容量/kvar	1000	0	1590	410	1000	850	4850	210.7

表 5 优化后的网损及谐波电压

Tab.5 System loss and harmonic voltage after being optimized

节点	基波电压	HD3%	HD5%	HD7%	HD11%	运行电压	THD%
1	0.9822	0.8924	0.8184	1.3333	0.0167	0.9829	3.73
2	0.9713	0.9091	0.8340	1.3579	0.0170	0.9720	3.8
3	0.9688	0.9073	0.8322	1.3554	0.0169	0.9695	3.79
4	0.9669	0.9059	0.8309	1.3535	0.0169	0.9676	3.79
5	0.9645	0.9040	0.8291	1.3510	0.0169	0.9652	3.78
6	0.9631	0.9028	0.8280	1.3494	0.0169	0.9637	3.78
7	0.9619	0.9019	0.8271	1.3481	0.0168	0.9625	3.77
8	0.9694	0.9160	0.8405	1.3678	0.0171	0.9701	3.83
9	0.9664	0.9241	0.8486	1.3808	0.0173	0.9671	3.87
10	0.9639	0.9325	0.8569	1.3941	0.0174	0.9646	3.9
11	0.9616	0.9405	0.8649	1.4068	0.0175	0.9623	3.94
12	0.9602	0.9372	0.8617	1.4021	0.0174	0.9610	3.93
13	0.9601	0.9371	0.8616	1.4020	0.0174	0.9608	3.93
14	0.9680	0.9189	0.8431	1.3712	0.0172	0.9687	3.84
15	0.9673	0.9145	0.8391	1.3651	0.0171	0.9680	3.82
16	0.9798	0.8904	0.8166	1.3306	0.0166	0.9804	3.72
17	0.9793	0.8901	0.8163	1.3302	0.0166	0.9800	3.72
18	0.9623	0.9022	0.8274	1.3486	0.0168	0.9630	3.77

采用本文方法对系统某日的无功补偿进行优化, 并与常规的静态优化方法(不考虑谐波的影响和投切代价)作了比较。算法中电容器单组容量取 10 kvar。投切代价 C 取 10 kW/次, 遗传算法交叉概率取 0.7, 变异概率为 0.2, 禁忌表深度为 40。谐波电流按式(12)产生, 考虑的谐波次数为 3, 5, 7, 11。

$$I_k = \frac{\lambda}{k} \times \frac{P_i - jQ_i}{U_{i1}} \quad (12)$$

式中: k 为谐波次数; λ 为谐波含量, 本文 λ 取 1; P_j, Q_j 为节点有功和无功负荷; U_{i1} 为节点基波电压。

从表 6 可以看出, 全天电网的谐波电压畸变没有超过国家规定的 4%, 该模型以在目标函数中计及

投切代价的方式考虑了电容器投切次数的限制, 避免将投切次数的限制作为一个全局的约束条件, 从而使优化既能分时段独立地进行, 又能有效避免电容器的频繁投切, 计算量与常规静态优化算法相当, 相对于常规静态优化, 动作次数大幅减少。所得投切策略的可操作性强, 避免了常规静态优化不考虑投切次数的局限性。

表 6 不同方法的电容器投切优化计算结果

Tab.6 Comparison of capacitor switching optimal results by different methods

	常规静态优化	本文优化
全天最大 THD/%	4.5	3.98
最大动作次数	12	5
系统最高电压/p.u	1.0	1.0
系统最低电压/p.u	0.9011	0.9083
平均计算速度/s	7.9	8.3
24 时段总时间/s	188.7	198.4

5 结论

本文建立了考虑谐波影响和计及投切代价的电容器投切的数学模型, 针对本章的优化模型, 提出了基于遗传禁忌算法的配电网电容器投切优化求解方法。经过算例仿真分析, 本文方法有以下几个特点:

(1) 计算规模与常规静态优化相当, 能够满足在线优化计算的需要。

(2) 可有效控制电容器组的投切次数, 所得投切策略的可操作性强。

(3) 考虑了谐波畸变率约束, 可避免电容器投切过程中的谐波放大, 保证电容器的安全运行。

参考文献

- [1] 吴秀华, 朴在林, 徐静, 等. 基于改进粒子群优化算法的电力系统无功电压综合控制[J]. 继电器, 2007, 35(21): 30-38.
WU Xiu-hua, PIAO Zai-lin, XU Jing, et al. Reactive power and voltage control based on improved particle swarm optimization in power system[J]. Relay, 2007, 35(21): 30-38.
- [2] 鲍雅萍, 秦长海. 基于PCC控制的无功补偿装置的原理与分析计算方案[J]. 继电器, 2007, 35(17): 41-43.
BAO Ya-ping, QIN Chang-hai. The principle and analytic procedure of the reactive compensation device based on the PCC control[J]. Relay, 2007, 35(17): 41-43.
- [3] 董国震, 和敬涵. 电力系统局部电路谐波谐振产生原因分析及对策[J]. 继电器, 2007, 35(1): 77-84.

(下转第 89 页 continued on page 89)

- [2] 国务院办公厅. 国务院办公厅关于转发发展改革委等部门节能发电调度办法(试行)的通知(国办发[2007](53号))[S]. 北京: 国务院, 2007.
- [3] 毛毅, 车文妍. 兼顾节能与经济效益的月度发电计划模型[J]. 现代电力, 2008, 25(5): 73-78.
MAO Yi, CHE Wen-yan. Monthly generation scheduling considering energy-saving and economic benefit[J]. Modern Electric Power, 2008, 25(5): 73-78.
- [4] 范玉宏, 张维, 韩文长, 等. 区域电网节能发电调度模式研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(16): 107-111.
FAN Yu-hong, ZHANG Wei, HAN Wen-chang, et al. Research on energy-saving generation dispatching model in regional grid[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(16): 107-111.
- [5] 严宇, 马珂, 于钊, 等. 改进发电调度方式实施节能、环保、经济调度的探讨[J]. 中国电力, 2007, 40(6): 6-9.
YAN Yu, MA Ke, YU Zhao, et al. Primary research on improvement in generation dispatching mode to implement energy conservation and environmental protection and economic dispatching[J]. Electric Power, 2007, 40(6): 6-9.
- [6] 张森林. 节能发电调度配套上网电价定价机制研究[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 105-110.
ZHANG Sen-lin. Research on pricing mechanism of bidding price in set with energy conservation power generation dispatch[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 105-110.
- [7] 汤伟, 王漪, 于继来, 等. 编制直调火力发电单元月度电能交易计划的综合耗量优化法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 64-70.
TANG Wei, WANG Yi, YU Ji-lai, et al. Synthesis consumption cost optimization method for making monthly trade schedule of grid dispatched thermal power generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 64-70.
- [8] 汤伟, 王漪, 于峰, 等. 编制直调火力发电单元月度电能交易计划的综合成本加权法[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 167-173.
TANG Wei, WANG Yi, YU Feng, et al. An integrative cost weighted method for drawing up electric energy monthly transaction schedule of directly dispatched thermal power generation units[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 167-173.
- [9] 王漪, 汤伟, 罗桓桓, 等. 编制直调火力发电单元月度电能交易计划的负荷率偏差法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 134-140.
WANG Yi, TANG Wei, LUO Huan-huan, et al. Load ratio deflection method for making monthly trade schedule of directly dispatched thermal power generation units[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 134-140.

收稿日期: 2010-03-03; 修回日期: 2010-04-15

作者简介:

张慧琦(1978-), 女, 工程师, 主要从事电力市场方面的研究与应用工作;

常永吉(1972-), 男, 博士, 助理研究员, 研究方向为电力系统动态仿真. E-mail: cyj@hagongda.com

(上接第 83 页 continued from page 83)

- DONG Guo-zhen, HE Jing-han. Causal analysis and countermeasure on harmonic resonance in local circuit of electric power systems[J]. Relay, 2007, 35(1): 77-84.
- [4] 田友元. 电力系统并联电容器运行的谐波问题[J]. 电力电容器, 1999(2): 1-7.
- [5] 赵登福, 刘昱, 夏道止. 考虑开关动作次数约束的配电网无功电压控制方法的研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(8): 783-786.
ZHAO Deng-fu, LIU Yu, XIA Dao-zhi. Reactive power/voltage control of distribution system considering the constraint of the maximum allowable number of switching operations[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2003, 37(8): 783-786.
- [6] 张伏生, 李燕累, 汪鸿. 基于Tabu 搜索算法的配电网电容器优化配置[J]. 电网技术, 2003, 27(4): 72-75.
ZHANG Fu-sheng, LI Yan-lei, WANG Hong. Optimal configuration of capacitors in distribution network based on Tabu search algorithm[J]. Power System Technology, 2003, 27(4): 72-75.
- [7] 赵勇, 韩春立, 李建华, 等. 兼顾降低网损和抑制谐波要求的配电网优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 7-10.
ZHAO Yong, HAN Chun-li, LI Jian-hua, et al. Distribution network optimal operation for loss reduction and harmonic mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 7-10.
- [8] 李珊君, 滕福生. 有谐电网无功优化的灵敏度分析法[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2000, 32(2): 81-84.
LI Shan-jun, TENG Fu-sheng. The security method for reactive power optimization in power system with multi-harmonic sources[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2000, 32(2): 81-84.

收稿日期: 2010-02-15; 修回日期: 2010-04-06

作者简介:

郝福忠(1971-), 男, 高级工程师, 硕士, 长期从事电气工程研究;

赵锋(1975-), 男, 经济师, 本科, 主要从事无功电压和电能质量管理工作; E-mail: mootao@163.com

李晋城(1968-), 男, 高级工程师, 本科, 主要从事继电保护研究。