

LC 输出滤波器的改进及在 STATCOM 应用中优化设计

荣 飞, 罗 安, 盘宏斌, 欧剑波

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

摘要: 针对 LC 输出滤波器在滤除逆变器开关器件通断时引起的高频毛刺时的不足, 提出对 LC 输出滤波器的改进方法, 即在 LC 输出滤波器的电容上串联一个小电阻, 使改进后的 LC 输出滤波器能有效地抑制静止无功发生器 (STATCOM) 装置与电网发生的谐振。从无功补偿能力和瞬态电流跟踪能力两方面讨论了改进的 LC 输出滤波器对 STATCOM 装置的影响。运用改进的遗传算法对改进 LC 输出滤波器的参数进行优化设计, 使其在滤除高频谐波的同时, 兼顾无功补偿能力。采用 Matlab 软件进行模拟仿真的结果表明, 所提出的设计方法能满足系统无功补偿的要求。

关键词: 改进 LC 输出滤波器; 无功补偿能力; 瞬态电流跟踪能力; 遗传算法; 参数优化

中图分类号: TM 711

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)09-0083-05

0 引言

输出滤波器作为新型静止无功发生器 (STATCOM) 装置的重要组成部分, 主要滤除逆变器开关器件通断时引起的高频毛刺。但如果输出滤波器的设计不合理, 一方面不能有效抑制高频毛刺谐波通过连接电抗器注入电网, 另一方面还会影响整个 STATCOM 装置的无功补偿能力^[1]。目前, 对 STATCOM 的研究主要集中在装置的拓扑结构及控制算法方面^[2-6], 很少涉及输出滤波器。相关的文献^[7-8]大多从输出滤波器在有源电力滤波器 (APF) 的应用中进行讨论, 不能完全指导 STATCOM 中输出滤波器的设计; 少有的几篇文献^[9-12]也仅仅提到在 STATCOM 中应该采用什么样的输出滤波器, 而没有给出具体的设计方式。文中首先分析了 LC 输出滤波器的滤波特性, 提出了对 LC 输出滤波器的滤波电容串联一个阻值不大的电阻能有效抑制与电网发生的谐振; 然后从无功补偿能力和瞬态电流跟踪能力 2 个方面分析了改进 LC 输出滤波器对 STATCOM 装置的影响, 并以此为基础提出运用改进遗传算法进行输出滤波器的参数优化设计, 使输出滤波器在滤除高频谐波的同时, 兼顾无功补偿能力和电流跟踪能力。实例设计表明该方法能够确保输出滤波器更好地满足整个系统的要求。

1 LC 输出滤波器的滤波特性分析

STATCOM 在补偿无功的同时也会输出一定的高频谐波毛刺, 这是由逆变器的开断所带来的。为了避免将这种高频信号注入到电网中, 需要设置输

出滤波器。考虑到滤波效果, 大多使用 LC 输出滤波器, 如图 1 所示, 其中 u_s 表示电网电源电压, Z_s 表示传输线路阻抗, Z_L 表示负载阻抗, T 表示 STATCOM 与电网之间的连接变压器, L_0 、 C_0 构成逆变器的输出滤波器, C 是逆变器直流侧电容。

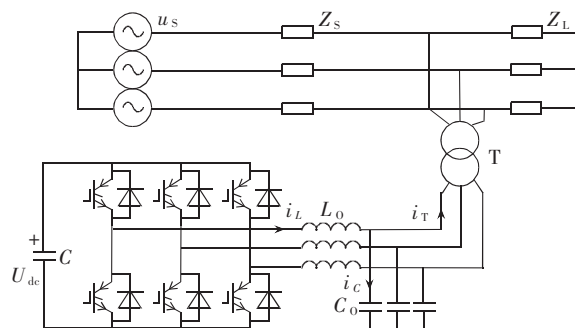


图 1 STATCOM 装置结构图

Fig.1 Structure of STATCOM

采用 LC 滤波器的 STATCOM 装置单相等效电路如图 2 所示, 其中 L_T 代表连接变压器的等效漏抗, u_{inv} 代表逆变器输出电压。

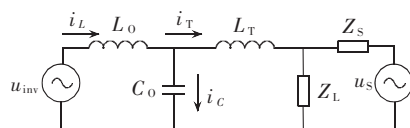


图 2 STATCOM 装置单相等效电路图

Fig.2 Single-phase equivalent circuit of STATCOM

根据欧姆定律, 可以求得输出滤波器对 u_{inv} 和 u_s 的增益分别为

$$H_1(\omega) = \left| \frac{i_T}{u_{inv}} \right| = \frac{|Z_{C0}|}{|(Z_{C0} + Z_{L0})A + Z_{C0}Z_{L0}|} \quad (1)$$

$$H_2(\omega) = \left| \frac{i_T}{u_s} \right| = \frac{|Z_L|}{|(Z_L + Z_s)B + Z_LZ_s|} \quad (2)$$

其中

$$A = \frac{Z_S Z_L}{Z_S + Z_L} + Z_{LT}, \quad B = \frac{Z_{C0} Z_{L0}}{Z_{C0} + Z_{L0}} + Z_{LT} \quad (3)$$

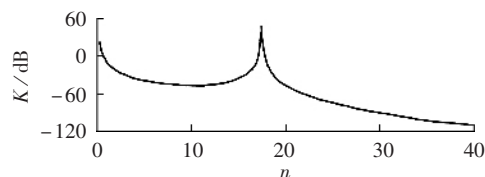
$$Z_{L0} = j\omega L_0, \quad Z_{C0} = \frac{1}{j\omega C_0}, \quad Z_{LT} = j\omega L_T$$

实际系统中, Z_S 、 Z_L 一般难以测量, 因此难以用解析式表示, 可令:

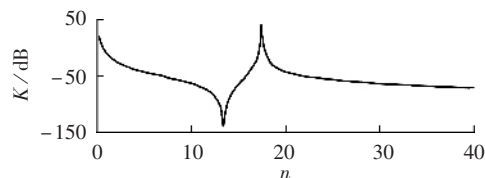
$$Z_S = R_S + jX_S(\omega) \quad (4)$$

$$Z_L = R_L + jX_L(\omega)$$

为了考察输出滤波器的滤波特性, 图 3 给出了 $H_1(\omega)$ 和 $H_2(\omega)$ 的频率响应曲线, 横坐标为谐波次数 n , 纵坐标为波特增益 K (图 4 同)。各元件参数如表 1 所示, 设线路长 10 km。



(a) $H_1(\omega)$ 的频率响应曲线图



(b) $H_2(\omega)$ 的频率响应曲线图

图 3 输出滤波器频率响应曲线图

Fig.3 Frequency response curves of output filter

表 1 元件参数表

Tab.1 Element parameters

元 件	值	元 件	值
输出电感/mH	1	负载电抗/mH	58.2
输出电容/ μ F	90	线路电阻/ $[\Omega \cdot (\text{km})^{-1}]$	0.01
变压器等效漏抗/mH	0.02	线路电抗/ $[\text{mH} \cdot (\text{km})^{-1}]$	0.3
负载电阻/ Ω	1.6		

从图 3 可以看出, 在 18 次谐波附近有个明显的谐振点, 波特增益达到 50 dB, 如果逆变器在该频率附近有毛刺输出, 将会被严重放大, 为此必须改进 LC 输出滤波器, 使其在各频段都有较好的滤波效果。

2 改进 LC 输出滤波器设计

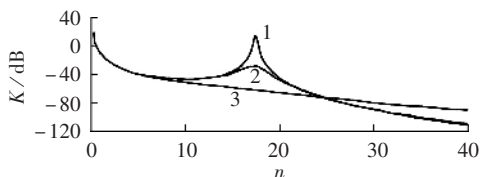
为抑制谐振, 将 LC 滤波器的电容串联一个电阻, 其输出电流对 u_{inv} 和 u_S 的增益如式(1)(2)所示, 但:

$$Z_{C0} = \frac{1}{j\omega C_0} + R \quad (5)$$

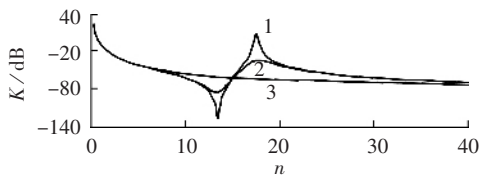
式中 R 为串联电阻值; 其他参数如式(3)所示。

图 4 给出了改进 LC 输出滤波器的频率响应曲线。其中, 曲线 1、2、3 分别是 R 为 0.1 Ω 、1 Ω 、10 Ω 时的响应曲线。从图中可看出, 3 种情况下的波特增益都远小于 0, 表示能有效抑制谐振现象, 并且随着 R 的增大抑制效果更好; 但随着 R 的增大, 在更

高频段, 其谐波抑制能力不如较小的 R 值, 因此, 在实际使用过程中, R 的取值在 1 Ω 左右就可以了。



(a) 改进 LC 滤波器的 $H_1(\omega)$ 的频率响应曲线



(b) 改进 LC 滤波器 $H_2(\omega)$ 的频率响应曲线

图 4 改进 LC 滤波器频率响应曲线图

Fig.4 Frequency response curves of improved LC filter

3 改进后滤波器对 STATCOM 装置的影响

输出滤波器一方面能有效滤除逆变器输出的高频毛刺分量, 另一方面也起到将逆变器输出的电压转化为无功电流的作用。因此, 输出滤波器的设计对 STATCOM 有很大的影响。

从改进 LC 输出滤波器对 STATCOM 装置无功补偿能力及瞬态电流跟踪能力的影响进行分析。

3.1 无功补偿能力

图 5 为采用改进 LC 输出滤波器的 STATCOM 装置单相等效电路图, 并用电压源 u_{pcc} 代替接入点的电压。

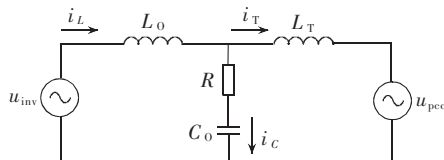


图 5 改进 STATCOM 装置的单相等效电路图

Fig.5 Single-phase equivalent circuit of improved STATCOM

其中, R 是串联在滤波电容上的电阻。从图中可以看出, i_L 为逆变器输出电流, 该电流分为 2 部分: 一部分经滤波电容 C_0 输出, 另一部分注入电网起到补偿电网无功的作用。为了使 STATCOM 装置的无功补偿能力高, 需保证在相同的逆变器输出电流下, 注入电网的无功电流尽可能大。为此, 定义 i_T/i_L 作为评价 STATCOM 装置无功补偿能力的性能指标。

根据欧姆定律可得:

$$\frac{i_T}{i_L} = \frac{A-B}{C+(A-B)D} \quad (6)$$

其中:

$$A = \frac{Z_{L0} u_{inv}}{Z_{L0}(Z_{C0}+R) + Z_{L0} Z_{LT} + (Z_{C0}+R) Z_{LT}}$$

$$B = \frac{(Z_{L0}+Z_{C0}+R) u_{pcc}}{Z_{L0}(Z_{C0}+R) + Z_{L0} Z_{LT} + (Z_{C0}+R) Z_{LT}}$$

$$C = \frac{u_{inv}}{Z_{L0} + Z_{C0} + R}, D = \frac{Z_{C0} + R}{Z_{L0} + Z_{C0} + R}$$

分析式(6)可知, C_0 越大, 其无功补偿能力越弱。这是由于, 滤波电容越大, 大部分无功电流都经滤波电容输出, 严重影响了装置的无功补偿能力。

3.2 瞬态电流跟踪能力

为了分析输出滤波器对 STATCOM 装置瞬态电流跟踪能力的影响, 写出电路的微分方程:

$$\begin{cases} u_{inv} = L_0 \frac{di_L}{dt} + R i_C + U_{C0} \\ i_C = C_0 \frac{dU_{C0}}{dt} \\ i_L = i_T + i_C \\ u_{inv} - u_{pcc} = L_0 \frac{di_L}{dt} + L_T \frac{di_T}{dt} \end{cases} \quad (7)$$

其中, U_{C0} 表示滤波电容两端电压, 解得:

$$i_1 = K e^{-\delta t} \cos(\omega t + \phi) + G_2(t) \quad (8)$$

其中, 第一部分表示解的暂态部分, $G_2(t)$ 表示解的稳态部分。由于具体的求解过程比较复杂, 这里只给出反映瞬态电流跟踪能力的 δ :

$$\delta = \frac{R(L_T + L_0)}{2L_T L_0} \quad (9)$$

从上式可知, 随着 L_0 的减小, 暂态分量的衰减变快, 考虑在 Δt 时间内要求暂态分量衰减到 λ , 则必须满足:

$$e^{-\frac{R(L_T + L_0)}{2L_T L_0} \Delta t} \leq \lambda \quad (10)$$

4 参数优化

输出滤波器的主要作用是抑制逆变器开关器件产生的高频谐波电流注入到电网之中, 设逆变器的开关角频率为 ω_c , 产生的主要高频谐波次数在 $k_1 \sim k_2$ 之间, 则要求谐波畸变率最小, 即

$$\text{Min} \sum_{i=k_1}^{k_2} H_1(\omega_i) \quad (11)$$

综合前述分析可知, 输出滤波器参数优化问题是一个典型的多目标优化问题:

$$\begin{cases} F_1(L_0, C_0) = \text{Min} \sum_{i=k_1}^{k_2} H_1(\omega_i) \\ F_2(L_0, C_0) = \text{Min}(i_T / i_L) \\ F_3(L_0) = \text{Min} \left(e^{-\frac{R(L_T + L_0)}{2L_T L_0} \Delta t} \right) \end{cases} \quad (12)$$

传统的遗传算法对优化目标直接构造适应度函数^[14-15], 没有考虑各个目标对输出滤波器的影响程度是不一样的。为此, 对适应度函数进行了修改。

以 F_1 为例, 设当 $F_1 > F_{1\max}$ 时, 输出滤波器完全不能满足要求; 当 $F_1 < F_{1\min}$ 后, 进一步减小 F_1 值对输出滤波器的影响很小, 则可以构造如下适应度函数:

$$f_1 = \begin{cases} 0 & F_1 > F_{1\max} \\ \alpha_1 + (1 - \alpha_1) \frac{F_{1\max} - F_1}{F_{1\max} - F_{1\min}} & F_{1\max} \geq F_1 \geq F_{1\min} \\ 1 & F_1 < F_{1\min} \end{cases} \quad (13)$$

其中, $0 \leq \alpha_1 \leq 1$, 表示目标的重要程度, α_1 越大, 当 $F_{1\max} \geq F_1 \geq F_{1\min}$ 时, 该染色体被选中的概率越大。

类似可以构造其他几个目标的适应度函数 f_2, f_3 。

在寻优过程中应使种群向 f_1 较大的方向进化的同时, 兼顾 f_2 和 f_3 向较大的方向进化, 使三者都能取得较好值, 避免算法陷入局部最优解。据此, 对第 t 代染色体选择操作如下:

a. 将 $f_{1i} = 1$ 或 $f_{2i} = 1$ 或 $f_{3i} = 1$ 的染色体 i 以 100% 的概率选择到下一代;

b. 对满足 $f_{2i} > 0$ 且 $f_{3i} > 0$ 的染色体 i , 以 P_{S1} 进行选择;

c. 对满足 $f_{2i} > 0$ 但不满足 $f_{3i} > 0$ 的染色体以概率 P_{S2} 进行选择;

d. 对满足 $f_{3i} > 0$ 但不满足 $f_{2i} > 0$ 的染色体以概率 P_{S3} 进行选择;

e. 对既不满足 $f_{2i} > 0$, 又不满足 $f_{3i} > 0$ 的染色体以概率 P_{S4} 进行选择, 其中

$$\begin{cases} P_{S1} = \frac{f_{1i}}{\sum_{k=1}^N f_{1k}}, P_{S2} = \frac{f_{1i}}{\sum_{k=1}^N f_{1k}} \frac{f_{2i}}{\sum_{k=1}^N f_{2k}} \\ P_{S3} = \frac{f_{1i}}{\sum_{k=1}^N f_{1k}} \frac{f_{3i}}{\sum_{k=1}^N f_{3k}}, P_{S4} = \left(\frac{f_{1i}}{\sum_{k=1}^N f_{1k}} \right)^3 \end{cases} \quad (14)$$

式中 N 为种群规模。

f. 为保持种群规模不变, 在上述选择操作完成后, 根据已选染色体数量, 复制一定数目的良种染色体, 以补足种群。

为避免算法陷入局部解, 采用一种自校正参数调整的方法克服算法的早熟收敛, 即在使用遗传算法进行参数寻优的过程中, 对交叉概率 P_C 和变异概率 P_M 进行自调整, 让它们随染色体适应度值增加而变小, 随着染色体适应度值减小而变大, 计算公式如下:

交叉概率为

$$P_C = \begin{cases} K_1 \frac{f_{\max} - f'}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f' \geq f_{\text{avg}} \\ K_2 & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (15)$$

变异概率为

$$P_M = \begin{cases} K_3 \frac{f_{\max} - f}{f_{\max} - f_{\text{avg}}} & f \geq f_{\text{avg}} \\ K_4 & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (16)$$

式中 $f_{\max}$ 为当前种群中染色体适应度的最大值; f_{avg} 为当前种群中染色体平均适应度值; f' 为参与交叉操作的 2 个染色体的适应度较大的一个; f 为参与变异的染色体适应度值; K_1, K_2, K_3, K_4 是不大于 1 的正常数, 可由具体问题相应调整。由以上分析, 得到优化算法步骤。

a. 根据系统设计要求初始化常量, 置 $t=0$ 。

b. 采用实数编码, 在论域中产生规模为 N 的初始种群。

- c. 按照上述选择机制对染色体进行选择。
- d. 以概率 P_C 对染色体进行等位基因交叉。
- e. 以概率 P_M 对染色体进行变异。
- f. 对种群中染色体适应度进行评估,若种群内所有染色体的适应度函数值都大于 0,且连续 3 代种群的最大适应度函数值的变化量均小于一个很小的正数,则算法已收敛,选择种群内概率 P_{best} 最大的染色体作为最终解输出;若算法尚未收敛,则 $t=t+1$,转到 c。其中,

$$P_{best} = f_{1i} f_{2i} f_{3i} \quad (17)$$

5 实例设计

根据表 1 元件参数,阈值 F_{1max} 、 F_{1min} 、 F_{2max} 、 F_{2min} 、 F_{3max} 、 F_{3min} 分别取 5%、0.1%、99%、50%、10%、1%, $\Delta t=0.2$ ms, $R=1\ \Omega$, $\alpha_1=0.5$, $\alpha_2=0.2$, $\alpha_3=0$, 逆变器开关频率取 6.4 kHz 进行优化设计,与传统设计方法所得结果比较,如表 2 所示。

表 2 传统方法与优化方法设计结果比较

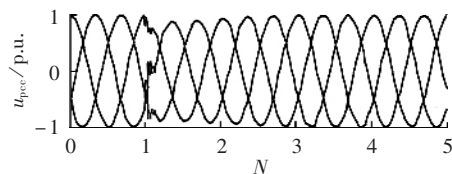
Tab.2 Comparison of design results between traditional method and optimal strategy

目标	传统方法	优化方法
滤波电感/mH	1	1.8
滤波电容/ μ F	90	31
F_1	1.42 %	1.12 %
F_2	98.4 %	99.1 %
F_3	6.1 %	6.4 %

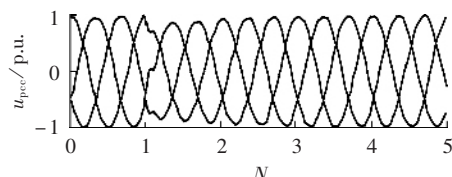
对比可知,优化方法设计的输出滤波器虽然在瞬态电流跟踪能力上差一些,但其滤波性能及无功补偿能力更好。

为验证经优化设计的输出滤波器的工作效果,采用 Matlab 软件进行了模拟仿真,各项参数选择如前所述。仿真结果如图 6 所示(图中, N 为周期数),其中 u_{pec} 表示接入点电压,系统于 1 个周期时投入感性负载。

从图 6 中可看出,在电路结构和控制方法相同的条件下,采用优化设计输出滤波器的 STATCOM 装置对电网的谐波污染更小,并能在 1 个周期内稳定接入点电压,具有良好的控制效果。



(a) 优化参数仿真结果图



(b) 经验参数仿真结果图

图 6 仿真结果图

Fig.6 Simulative results

6 结论

分析了 LC 输出滤波器的不足,提出了对 LC 滤波器的改进方法,即在 LC 输出滤波器的电容上串联一个小电阻,指出改进后的输出滤波器能有效抑制 STATCOM 装置与电网发生的谐振。此外,分析了输出滤波器对 STATCOM 装置无功补偿能力及瞬态电流跟踪能力的影响,指出过大的滤波电容将会使无功补偿能力变差,过大的滤波电感将会使跟踪能力变差,为此采用了遗传算法对输出滤波器参数进行优化设计,使输出滤波器在有效滤除高频谐波的同时,能兼顾较好的无功补偿能力和瞬态电流跟踪能力。仿真结果表明,采用所提出的设计方法,能更好地满足系统无功补偿的要求。

参考文献:

- [1] WANG Timothy - cy, YE Zhi - hong, SINHA Gau - tam, et al. Output filter design for a grid - interconnected three - phase inverter [C]// Power Electronics Specialist Conference. Niskayuna, USA: IEEE, 2003: 779 - 784.
- [2] 陶礼学, 姚刚, 周荔丹, 等. 基于 IGBT 的 ± 10 kvar STATCOM 装置设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(5): 61 - 65.
TAO Li - xue, YAO Gang, ZHOU Li - dan, et al. Design of ± 10 kvar STATCOM based on IGBT [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(5): 61 - 65.
- [3] 章勇高, 康勇, 刘黎明, 等. 静止同步补偿器的双环控制系统设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 62 - 66.
ZHANG Yong - gao, KANG Yong, LIU Li - ming, et al. Double-loop control design of STATCOM [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 62 - 66.
- [4] 谢小荣, 崔文进, 唐义良, 等. STATCOM 无功电流的鲁棒自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(4): 35 - 39.
XIE Xiao - rong, CUI Wen - jin, TANG Yi - liang, et al. Robust adaptive control of STATCOM's reactive current [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(4): 35 - 39.
- [5] 王海风, 李海峰, 陈珩. 电力系统电压的体液免疫学习控制[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 31 - 36.
WANG Hai - feng, LI Hai - feng, CHEN Heng. Power system voltage control based on learning humoral immune response [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 31 - 36.
- [6] 郭锐, 刘国海. 静止同步补偿器数学模型及其无功电流控制研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(1): 21 - 24.
GUO Rui, LIU Guo - hai. Study on STATCOM model and its control strategy [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(1): 21 - 24.
- [7] 范瑞祥, 罗安, 章兢, 等. 谐振注入式有源滤波器的输出滤波器研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(5): 96 - 101.
FAN Rui - xiang, LUO An, ZHANG Jing, et al. The output filter research of resonance injection active power filter [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(5): 96 - 101.
- [8] 钟庆, 张尧, 郑家玮, 等. 有源电力滤波器输出电感的最优选取(英文)[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(10): 17 - 20.
ZHONG Qing, ZHANG Yao, CHENG K W E, et al. Optimal selection of output inductance in active power filters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(10): 17 - 20.
- [9] BARRENAL J A, AURTENEACHEAL S, CANALES J M, et al. Design, analysis and comparison of multilevel topologies for DSTATCOM applications [C]// Proceedings of the EPE Conference. Dresden, Germany: [s.n.], 2005: 1 - 10.

- [10] KIM Hyo - sung, KIM Jangh - wan, KSIU S. A design consideration of output filters for dynamic voltage restorers[C] // Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Aachen, Germany: IEEE, 2004; 20-25.
- [11] WU E, LEHN P W. Digital current control of a voltage source converter with active damping of LCL resonance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(5): 1364-1373.
- [12] BOLSENS B, BRABANDERE K D, den KEYBUS J V, et al. Model - based generation of low distortion currents in grid - coupled PWM - inverters using a LCL output filter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2006, 21(4): 1032-1040.
- [13] 涂春鸣, 罗安. 无源滤波器的多目标优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 17-21.
TU Chun - ming, LUO An. Multi - objective optimal design of passive power filters [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3): 17-21.
- [14] LIU Juan, CAI Zi - xing, LIU Jian - qin. A novel genetic algorithm preventing premature convergence by chaos operator[J]. Journal of Central South University of Technology, 2000, 7(2):

100-103.

- [15] 王磊,张志文,高红专. 大功率有源滤波器主从式结构方案研究[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(12): 42 - 45.
WANG Lei, ZHANG Zhi - wen, GAO Hong - zhuan. Master - slave mode for high - power APF[J]. Electric power Automation Equipment, 2005, 25(12): 42 - 45.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

荣 飞(1978-),男,湖北仙桃人,博士研究生,主要从事电力系统谐波抑制及无功功率补偿方面的研究(E-mail: rf_hunu@126.com);

罗安(1957-),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,主要从事电气工程和科学与工程方面的教学和科研工作;

盘宏斌(1972-),男,湖南湘潭人,博士研究生,主要从事功率电力电子技术方面的研究;

欧剑波(1982-),男,湖南永州人,硕士研究生,主要从事无功补偿及谐波治理方面的研究。

Improvement of LC output filter and its optimization in STATCOM

RONG Fei, LUO An, PAN Hong-bin, OU Jian-bo

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: When used in voltage source inverter, LC output filter could not filter the high frequency burrs caused by the on - off switching of inverter, an improvement is proposed to connect a small resistor in serial to its capacitor. The improved LC output filter can effectively suppress the resonance between STATCOM and power network. Influences of improved LC output filter on STATCOM are discussed from both reactive power compensation ability and transient current tracking ability. Parameters of the output filter are optimized by improved genetic algorithm for effectively eliminating high frequency harmonics and compensating reactive power at the same time. Simulations with Matlab show that the proposed method meets the requirement for reactive power compensation.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(6074041).

Key words: improved LC output filter; reactive compensation ability; transient current tracking ability; genetic algorithm; parameter optimization

[illegible]