

DOI: 10.7667/PSPC201850

配电变压器集成化补偿系统的多目标分析及控制

尹项根¹, 王 祯¹, 陈 玉¹, 赖锦木¹, 雷二涛², 李浪子¹, 尹 昕³

(1. 湖北省电力安全与高效重点实验室(华中科技大学), 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 广东 广州 510080; 3. 曼彻斯特大学电气与电子工程学院, 曼彻斯特 M13 9PL)

摘要: 配电网中广泛使用的配电变压器是电能供给和需求的交汇点, 也是无功、谐波、不平衡等不利因素对供电产生影响的集散点。针对配电变压器集成化静止补偿系统(DT-STATCOM)结构, 对配电网无功、谐波和不平衡等电能质量问题进行分析, 提出了与配电网整体控制相协调的基于动态权重优化的多目标综合控制策略。在研究补偿机理的基础上, 分别设计了非线性无源控制电流内环跟踪、基于双旋转坐标系的比例准谐振控制、基于零序电压注入的负载电流不平衡校正方法。实验结果表明所提出的多目标综合控制策略能够有效提高 STATCOM 的动态响应速度, 改善综合补偿效果。

关键词: 配电变压器; 集成化补偿; 静止无功补偿器(STATCOM); 多目标控制

Multi-Object Analysis and Control of Static Synchronous Compensators Integrated with Distribution Transformer

YIN Xianggen¹, WANG Zhen¹, CHEN Yu¹, LAI Jinmu¹, LEI Ertao², LI Langzi¹, YIN Xin³

(1. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (HUST), State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology (HUST), Wuhan, 430074, China; 2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co.Ltd., Guangzhou, 510080, China; 3. School of Electrical & Electronic Engineering, University of Manchester, Manchester M13 9PL, U.K.)

Abstract: The widely used distribution transformer is a joint of power supply and requirement in distribution network. Meanwhile, it is a key point for reactive power, harmonics and other negative factors to affect power quality. In this paper, DT-STATCOM (Distribution Transformer STATCOM) is served to solve the power quality problems such as reactive power, harmonics, and unbalance in distribution grid. Then, a multi-objective integrated control strategy based on dynamic weight optimization coordinated with the overall control of the distribution network is proposed. On the basis of the study of the compensation mechanism, nonlinear passivity-based control (PBC), double-rotating-coordinate-based quasi-proportional resonant (PR) control and zero sequence voltage injection method are designed respectively. Simulation and experimental results validate the feasibility and effectiveness of proposed multi-objective integrated control strategy of DT-STATCOM.

This work is supported by National Key R & D Program of China (No. 2017YFB0902900) and National Natural Science Foundation of China (No. 51277084).

Key words: distribution transformer; STATCOM; integrated compensation; multi-object control

0 引言

分布式新能源发电、非线性负载等电力电子设备在配电网中应用越来越广泛, 此类设备具有频繁

投退、多谐波、大冲击、小惯性等特点, 大大增加了配网无功补偿和电能质量控制的复杂性。为解决上述问题, 基于全控型器件的 STATCOM、APF 等设备在现代配电网的节能降耗和电能质量控制中扮演着越来越重要的角色^[1-6]。

配电网电能质量治理通常采用高压侧集中式补偿和低压侧分散式补偿两种方式。高压侧集中式补

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902900); 国家自然科学基金项目资助(51277084)

偿受限于电力电子器件的耐压能力,常采用级联结构,成本较高^[7-8];低压侧分散式补偿存在安装点分散、补偿装置之间缺乏协调控制的问题,整体运行效率较低^[9-10]。基于此,在前期研究中^[11-12],提出了配电变压器集成 STATCOM(Distribution Transformer STATCOM, DT-STATCOM)补偿技术,在充分利用变压器富余容量实现对配网负载和变压器本身无功功率集中补偿的同时,通过变压器绕组抽头注入方式降低电压应力以减少补偿设备的综合成本,还能抑制负载侧电能质量问题向系统侧的扩散。

目前,针对高分布式发电渗透率的现代配电网电能质量问题,已开展了大量研究。文献[13]针对位于馈线末端的单相并网分布式发电(Distributed Generation, DG)系统,提出了鲁棒预测双环控制策略以实现无功补偿,电流内环采用鲁棒预测无差拍控制不仅缩减了 DSP 的控制延时,还增强了系统的鲁棒性。文献[14]提出了一种基于反演控制和高阶滑动模式微分器的新型非线性电流控制策略,以便采用分布式发电单元接口转换器主动补偿局部负载的谐波/间谐波。文献[15]将系统谐波抑制能力与主要的 DG 单元发电功能无缝集成,有效消除了 DG 单元中稳态基波电流跟踪误差的影响,在补偿谐波的同时,可以实现精确的功率控制。文献[16]提出了一种孤岛微网电压不平衡补偿的静止坐标系控制方法, DG 单元自主补偿电压不平衡。文献[17]指出,通过 DG 系统并网换流器实现对配电网电能质量问题治理的同时,却极大地影响了 DG 单元自身的运行性能。配电网中的电能质量问题并非以单一形式出现,通常无功、谐波和不平衡问题相伴产生,只有进行综合补偿才能更有效地实现电能质量问题的治理。

本文基于 DT-STATCOM 补偿技术,依据低损耗、高质量和高可靠的供电目标,进一步分析基于动态权重优化的多目标综合控制策略,以变压器高压绕组抽头作为 STATCOM 的接入点和补偿电流的注入点,提出与之相适应的无功指令电流检测方法,分别研究配电网无功补偿、谐波治理及不平衡校正的控制方法,通过仿真和动模实验证明所提基于动态权重优化的多目标综合控制方法的有效性。

1 配电变集成化补偿(DT-STATCOM)的系统构成及作用机理

1.1 DT-STATCOM 系统结构

配电变压器绕组抽头工艺简单,自其高压绕组接出抽头,基本不改变变压器的结构和设计,易于

实现所提集成化结构。另外,配电变压器中 Dyn11 联结组具有较强的耐受三相不平衡的能力,在配网中应用较为广泛。因此,本文重点讨论基于 Dyn11 联结组的配电变压器设计集成化结构。

基于 Dyn11 联结组的 DT-STATCOM 系统采用了级联多电平结构,拓扑结构如图 1 所示。在配电变压器的原边绕组上设计了三个连接抽头,标号为 A_1 、 B_1 、 C_1 ,抽头位置对称,保证 STATCOM 接入时三个线电压对称即可。理论上,STATCOM 接入电压可在 $0.5U_{AB} \sim U_{AB}$ 之间灵活选取,其中在中心抽头处电压应力最小为 $0.5U_{AB}$,在绕组顶点处电压应力最大(与传统无变压器的直挂式结构相同)。为了减少谐波注入,本文采用星形连接 H 桥级联 STATCOM 拓扑结构,输出设计含无源阻尼的三阶 LCL 滤波器,同时利用变压器的漏感,有效减小滤波电感体积和成本。

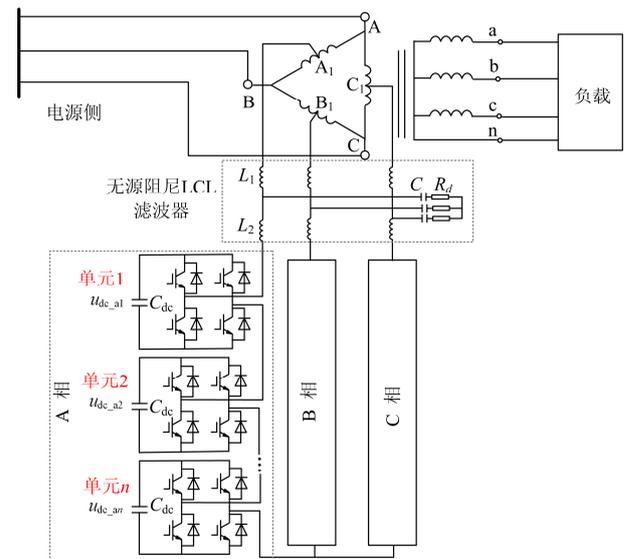


图 1 绕组抽头注入式一体化补偿装置结构图

Fig. 1 Diagram of the DT-STATCOM

1.2 DT-STATCOM 系统工作机理

DT-STATCOM 系统中变压器和 STATCOM 通过特殊的耦合方式进行连接,为了分析系统的工作原理,绘制图 2 所示的三相示意图。

图中 U_S 为电源侧电压, Z_S 为电源侧阻抗, i_S 为电源电流, i_C 为注入的补偿电流, i_L 为负载电流, W_1 为原边绕组匝数, W_2 为注入补偿电流绕组匝数, W_3 为副边绕组匝数。

根据磁势平衡,可得:

$$W_1 i_S + W_2 i_C + W_3 i_L = 0 \quad (1)$$

负载电流 i_L 可以分解为正序有功 i_{Lp}^+ 、无功 i_{Lq} 、谐

波 i_{Lh} 和负序 i_L^- 分量, 可得:

$$W_1 i_s + W_2 i_c + W_3 (i_{Lp}^+ + i_{Lq} + i_{Lh} + i_L^-) = 0 \quad (2)$$

当注入的补偿电流产生的磁通抵消负载电流产生的无功、谐波以及不平衡“磁通”, 此时电源侧电流仅提供正序有功“磁通”, 即:

$$W_2 i_c + W_3 (i_{Lq} + i_{Lh} + i_L^-) = 0 \quad (3)$$

DT-STATCOM 系统是利用注入电流的“增磁”和“去磁”作用实现负载无功、谐波的动态补偿以及负载不平衡的校正。

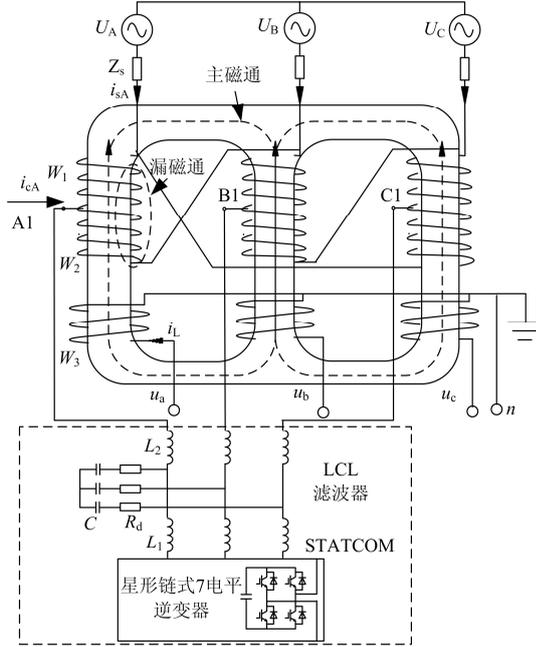


图2 DT-STATCOM 系统补偿原理示意图

Fig. 2 Compensation principle of DT-STATCOM

2 多电平 DT-STATCOM 总体控制策略

配电变压器作为输配电的关键节点, 是电能供给和需求的交汇点, 也是无功、谐波等不利因素对供电质量产生影响的集散点。在配电变压器处实现无功、谐波及不平衡的多目标综合补偿不仅可以改善负载侧电能质量, 还将有效抑制负载侧电能质量问题向系统侧的扩散。

本文以 Dyn11 配电变压器高压绕组抽头作为 STATCOM 的接入点和补偿电流的注入点, 基于链式多电平的 DT-STATCOM, 提出了跨端口无功指令电流检测方法, 基于动态权重优化的无功、谐波及不平衡的多目标综合补偿方法, 总体控制框图如图 3 所示。控制系统主要包括指令电流检测环节、动态权重分配环节、跨端口电气量补偿环节、内环电流跟踪环节、直流侧电容电压平衡环节^[18-20]和 PWM 调制等环节。

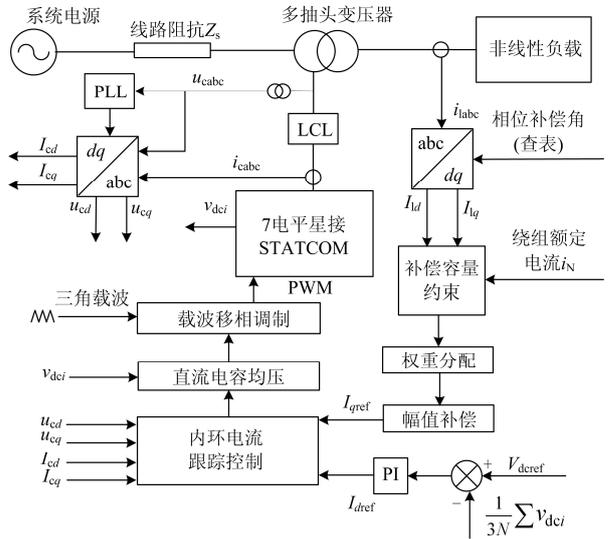


图3 DT-STATCOM 系统控制框图

Fig. 3 Control block diagram of DT-STATCOM

3 基于动态权重优化的多目标综合控制策略

配电网中的电能质量问题复杂多变, 通常无功、谐波和不平衡问题相伴产生, 只有进行综合补偿才能更有效地实现电能质量问题的治理。为降低控制复杂度, 将多目标综合补偿问题分解为多个单目标补偿问题, 分别求解补偿无功、谐波和不平衡所对应的无功、谐波和负序电流补偿分量, 在保证 DT-STATCOM 自身运行安全的前提下, 依据设备对电能质量的特定要求(如对于无功、谐波和不平衡中某一或多个指标要求比较高)为各补偿分量动态分配权重^[18-19], 以实现多目标综合控制。

根据 IEEE Standard 1459-2010, 稳态时瞬时电压和电流由工频分量 u_1 、 i_1 和余项 u_H 、 i_H 构成可以定义非正弦条件下的三相视在功率 S :

$$S^2 = (3VT)^2 = 9(V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) = \underbrace{(3V_1 I_1)^2}_1 + \underbrace{(3V_H I_H)^2 + (3V_H I_1)^2 + (3V_1 I_H)^2}_2 = S_1^2 + S_D^2 \quad (4)$$

由公式(4), 视在功率的平方可以分为两部分, 第 1 部分对应基波有效视在功率, 用 S_1^2 表示; 第 2 部分对应非基波有效视在功率, 用 S_D^2 表示。对于三相不平衡系统, 通过对称分量分解, S_1^2 可以进一步表示为

$$S_1^2 = (S_1^+)^2 + S_{U1}^2 \quad (5)$$

第 1 项对应正序分量, 第 2 项包括负序分量、零序分量以及基波电流与电压负序和零序的交叉

项, 也被称作不平衡功率。因此, 公式(4)可以进一步表示为

$$S^2 = \underbrace{(S_1^+)^2}_1 + \underbrace{S_{U1}^2}_2 + \underbrace{S_D^2}_3 \quad (6)$$

三相非正弦不平衡系统的视在功率可以分为三大部分, 第1部分为基波正序功率分量, 第2部分为不平衡功率分量, 第3部分为畸变功率分量, 包括电流畸变功率、电压畸变功率和谐波功率。进一步考虑第1项可以表示为

$$(S_1^+)^2 = (P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 \quad (7)$$

由以上推导可知, DT-STATCOM 系统对无功、谐波和不平衡的选择性补偿可以表示为选择单一补偿 Q_1^+ 、 S_{U1} 、 S_D 或者其组合。因此, 本项目定义了三个权重系数, 分别是 K_Q 、 K_U 和 K_D , 以表示不同补偿分量的权重分配。

实际配电网中广泛采用 Dyn11 变压器, 其对负载三相不平衡的耐受能力比较强, 且由于高压侧采用三角绕组, 三次谐波只能在绕组内部形成环流, 所以 DT-STATCOM 系统不需要对三次谐波进行补偿, 而通常三次谐波含量较大, 在一定程度上可以减小谐波补偿容量。此外, 按照相关供电规程, 配网的三相不平衡程度有较为严格的限制, 且电压一般是对称的, 虽然如此, 三相不平衡产生的负序分量危害较大, 所以在补偿容量允许的情况下, 优先对三相进行不平衡校正, 在补偿容量允许的情况下, 进一步治理谐波, 最后补偿无功, 提高功率因数。因此补偿权重的分配是一个动态决策的过程, 不同分量的权重并不是常数, 受到实际可利用的富余容量、负载的实际状况等因素的影响。

为了简化补偿权重的分配过程, 定义补偿目标函数 J :

$$\text{obj: } \min J = K_Q(Q_1^+)^2 + K_U(S_{U1})^2 + K_D(S_D)^2 \quad (8)$$

目标函数中采用平方项的目的是为了避免功率性质不同引起的符号问题, 将权重的分配问题转化为约束优化求解问题, 利用二次优化进行求解, 得到参考的权重, 用于 DT-STATCOM 的控制系统, 进而补偿相关的分量。

4 DT-STATCOM 基本控制策略

为了实现对配电网电能质量问题的多目标综合补偿, 将综合控制目标进行分解, 需完成指令电流跨端口检测及对无功、谐波或负载不平衡等单一控制目标的基本控制。以下分别对指令电流检测方法和无功补偿、谐波治理、不平衡校正的控制方法进行分析。

4.1 DT-STATCOM 指令电流检测

DT-STATCOM 补偿系统在结构设计上具有特殊性, STATCOM 的接入点并非传统的公共连接点 (PCC), 补偿电流的注入点位于变压器高压侧连接抽头, 而指令信号的检测点可以选择负载侧或系统侧, 检测点和补偿电流注入点跨越变压器, 由于变压器的传变特性, 在电气上存在幅值和相位差异。图 4 为适用于 DT-STATCOM 系统的跨端口指令电流检测算法的流程图, 在传统的基于瞬时无功理论的指令电流检测算法的基础上通过电流归算环节实现幅值补偿, 通过坐标变换因子实现相位补偿。

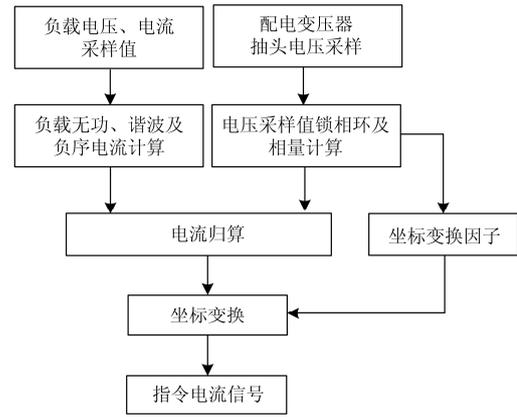


图 4 跨变压器指令电流检测方法

Fig. 4 Reference currents calculation method

4.2 基于非线性无源控制的无功补偿方法

传统 PI 控制器的设计采用的是近似线性化的方法, 鲁棒性较差, 难以适应复杂运行工况。基于能量整形和阻尼注入的无源控制是典型的非线性控制方法, 能够实现全局稳定, 同时对系统参数变化及外来扰动具有较强的鲁棒性^[20-21]。

建立图 1 所示的 DT-STATCOM 补偿系统在 dq 同步旋转坐标系下的数学模型, 选择 STATCOM 输出电流作为状态变量, 则可得:

$$\begin{aligned} & \mathbf{M}\dot{\mathbf{x}} + \mathbf{J}\mathbf{x} + \mathbf{R}\mathbf{x} = \mathbf{F} \\ & \mathbf{M} = \begin{bmatrix} L & 0 \\ 0 & L \end{bmatrix}, \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L \\ \omega L & 0 \end{bmatrix} \\ & \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{bmatrix} u_d - u_{Td} \\ u_q - u_{Tq} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_{Td} \\ i_{Tq} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (9)$$

式中: \mathbf{M} 为正定的对角阵; \mathbf{J} 为反对称阵, 反映了系统内部的互联情况; \mathbf{R} 为对称正定阵, 反映了系统的耗散性; \mathbf{F} 为外部输入。其中, $L=L_1+L_2$, R 为滤波器等效电阻, ω 为系统角频率, u_d 与 u_q 分别为 STATCOM 输出电压的 dq 分量, u_{Td} 与 u_{Tq} 为变压器抽头电压的 dq 分量, i_d 与 i_q 分别为 STATCOM

输出电流的 dq 分量。

通过上式可以看出, DT-STATCOM 是典型的无源系统, 建立系统的 EL 误差方程:

$$\mathbf{M}(\dot{\mathbf{x}}_e + \dot{\mathbf{x}}^*) + \mathbf{J}(\mathbf{x}^* + \mathbf{x}_e) + \mathbf{R}(\mathbf{x}^* + \mathbf{x}_e) = \mathbf{F} \quad (10)$$

其中, $\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}^* = [i_{cd} \ i_{eq}]^T$ 为误差信号, $\mathbf{x}^* = [i_{Td}^* \ i_{Tq}^*]$ 为参考电流。

为了提高系统的动态性能, 使系统尽快达到期望的参考输出平衡点, 通过注入阻尼, 加速系统的耗散可得新的控制律为

$$\mathbf{F} - (\mathbf{M}\dot{\mathbf{x}}^* + \mathbf{J}(\mathbf{x}^* + \mathbf{x}_e) + \mathbf{R}\mathbf{x}^* - \mathbf{R}_d\mathbf{x}_e) = 0 \quad (11)$$

其中, \mathbf{R}_d 为注入的虚拟阻尼项。

结合式(9)和式(11), 可得 DT-STATCOM 无源控制律为

$$\begin{cases} u_d = L \frac{di_{Td}^*}{dt} - \omega Li_{Tq} + Ri_{Td}^* - R_{d1}(i_{Td} - i_{Td}^*) + u_{Td} \\ u_q = L \frac{di_{Tq}^*}{dt} + \omega Li_{Td} + Ri_{Tq}^* - R_{d2}(i_{Tq} - i_{Tq}^*) + u_{Tq} \end{cases} \quad (12)$$

基于 EL 模型的无源控制的 DT-STATCOM 无功补偿综合控制框图如图 5 所示。

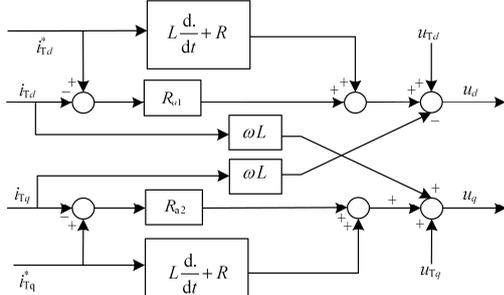


图 5 无源控制框图

Fig. 5 Passivity based control block

如图 6 所示, 仿真表明, 负载侧电压与电流波形存在明显相位差, 经 DT-STATCOM 补偿, 10 kV 电源侧电压电流可在半个周期内相位达到一致, 控制速度比较快。可知 DT-STATCOM 无功补偿效果良好。

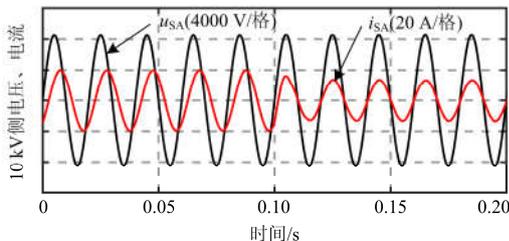


图 6 无功补偿前后 10 kV 侧 A 相电压电流仿真波形

Fig. 6 Simulation waveforms of the 10 kV side voltage and current of phase A

4.3 基于双旋转坐标变换的选择谐波补偿方法

配电网中的非线性负荷会产生大量谐波, 选择谐波补偿能够灵活分配补偿电流中各次谐波比例, 同时能够躲避配电网中可能存在的谐振点, 能够提升补偿单元的稳定性^[22-23]。

采用基于正负序双旋转坐标变换的选择谐波补偿方法, 能够减少 PR 控制器的数量。考虑到电网频率波动的影响, 普通 PR 控制器在非频率谐振点附近的增益大为减小, 无法实现无静差的跟踪, 故可采用抗频率波动的准 PR 控制器, 如式(13)所示。

$$G(s) = K_p + \frac{2K_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + \omega_0^2} \quad (13)$$

式中: K_p 为比例系数; K_R 为谐振系数; ω_c 为截止频率; ω_0 为谐振频率。考虑电网频率最大波动为 ± 0.5 Hz, 设计相应的截止频率, 能够保证控制器频率波动的适应性。

为实现对不同频次的谐波电流跟踪, 需要多个 PR 控制器控制器并联, 相应的谐波电流控制器为

$$H(s) = K_p + \sum_{h=6,12,\dots} \frac{2K_R\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (h\omega_0)^2} \quad (14)$$

由于 DT-STATCOM 结构的特殊性, 正负序坐标变换相位偏差不同, 因此需要设置不同的坐标变换因子对相位偏差进行补偿。基于双旋转坐标变换的选择谐波补偿控制框图如图 7 所示。

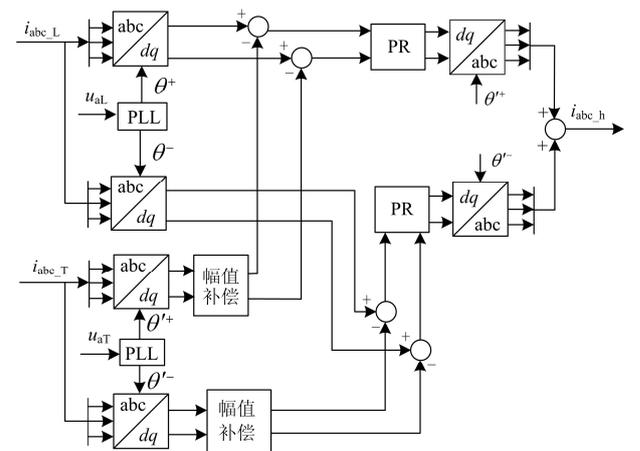


图 7 双旋转坐标系 PR 控制

Fig. 7 Harmonic currents suppression method

负载侧有功负载设置为 40 kW, 注入 5、7、11、13、17、19 次谐波电流, 谐波控制模块配置 6、12 与 18 次 QPR 控制器, 进行仿真测试, 效果如图 8 所示, 负载侧电流波形畸变严重, 经 DT-STATCOM 补偿后, 电网侧电流恢复正弦波形。可知 DT-STATCOM 谐波补偿效果良好。

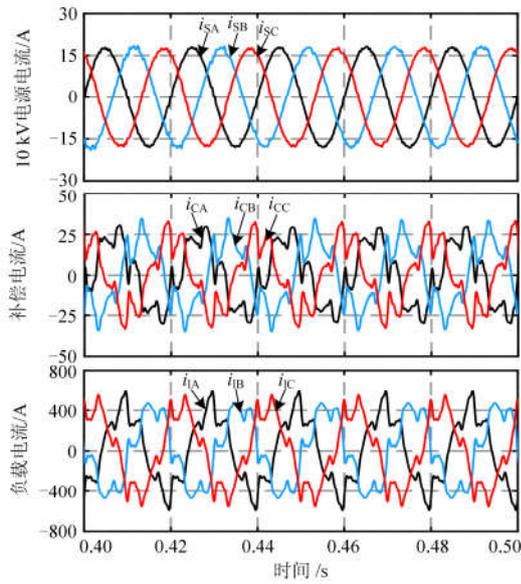


图 8 谐波补偿仿真波形

Fig. 8 Simulation waveforms of harmonic compensation

4.4 基于零序电压注入的负载不平衡校正

负载不平衡在配电网中广泛存在, 根据配电网运行标准要求配电网不平衡度应不超过 2%, 本文提出了基于无源控制的 STATCOM 不平衡校正方法, 以实现快速三相不平衡控制。为实现链式结构不平衡校正, 在输出负序电流的同时, 还需进行相间直流电压均压控制。为维持电容电压平衡, 星形连接的级联型 STATCOM 常采用零序电压注入法^[24-26]。零序电压计算框图如图 9 所示。

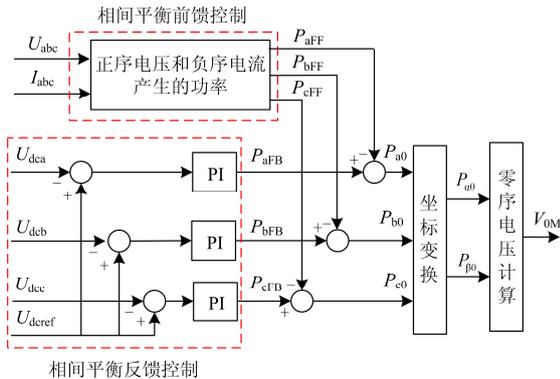


图 9 零序电压计算方法

Fig. 9 Zero sequence voltage calculation method

仿真结果如图 10 所示, 负载电流存在明显三相不对称, 经过补偿之后电源侧三相电流基本对称。

5 系统动模试验

为了验证前述机理分析和控制方法的正确性, 搭建动模试验平台, 电压等级为 800 V/380 V, 多抽

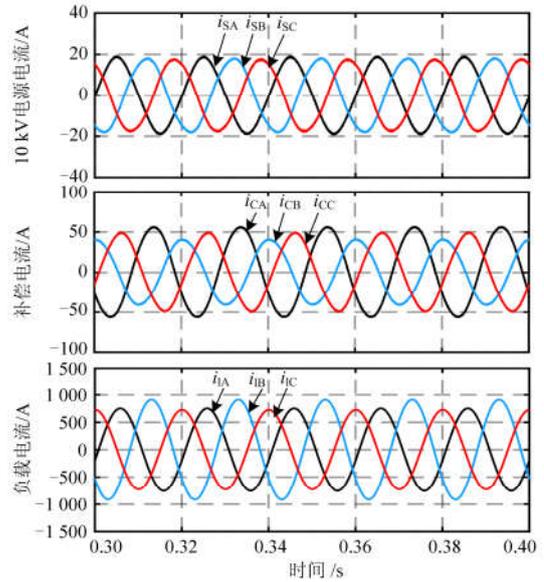


图 10 三相不平衡负载校正仿真波形

Fig. 10 Simulation waveforms of three phase imbalance compensation

头变压器容量为 50 kVA; 三电平补偿模块由四台额定容量为 25 A 的有源滤波器组成, 用于模拟无功和谐波负载, 有功负载为 3×1.6 kW, 由功率电阻模拟。STATCOM 补偿装置每相由三个 H 桥模块构成, 为减少高频谐波注入变压器, 输出采用带无源阻尼的 LCL 滤波器, 滤波器参数: 网侧电感为 0.2 mH, 逆变侧电感为 1 mH, 滤波电容为 10 μ F, 阻尼电阻为 2 Ω 。

首先验证无功补偿效果, 设置有源滤波器吸收感性无功, 峰值 10 A, 实验结果如图 11 所示, 其中 u_{SA} 为 A 相电源(相电压), i_{SA} 为 A 相电流, i_{CA} 为补偿装置的输出电流(即注入电流)。投入补偿装置前, 800 V 电源侧的功率因数为 0.72; 在 t 时刻, STATCOM 开始注入补偿电流, t_1 时刻达到稳态, u_{SA} 和 i_{SA} 保持同相位, 实现了对负载无功电流的完全补偿, 动态响应时间 Δt 约为半个工频周期(10 ms 左右)。此外, 由于系统电抗较大(12 Ω), 补偿前线路压降较大, 补偿后, 变压器原边电压有明显提升。

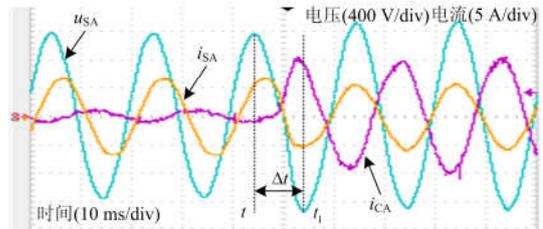


图 11 绕组注入式无功补偿实验效果

Fig. 11 Experimental results of the winding injection STATCOM

为了进一步验证集成化补偿系统的综合补偿效果(这里选取典型的无功+谐波组合), 设置 APF 吸收感性无功 10 A 和谐波电流(5 次 5 A, 七次 3.5 A)用于模拟常见非线性负载产生的谐波。实验结果如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 补偿前系统电流总谐波畸变率(THD)为 25.6%, 电压电流存在明显的相位差; 补偿后, 系统电流 THD 下降为 2.06%, 系统电压和电流保持同相位, 功率因数提高到 1。

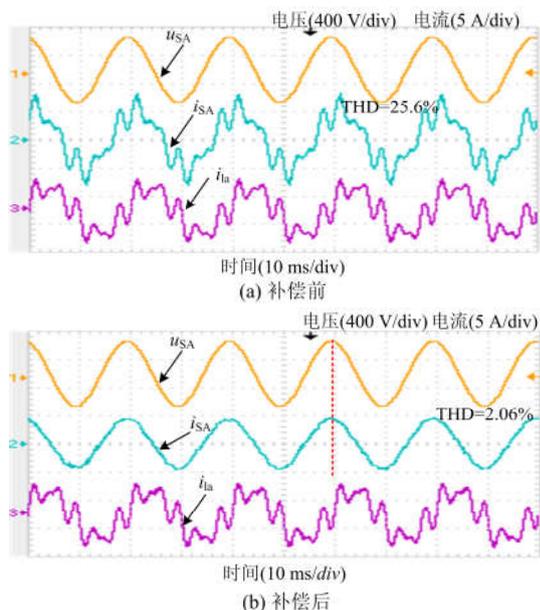


图 12 无功+谐波综合补偿实验结果

Fig. 12 Experimental results of reactive and harmonic currents compensation

为验证集成化补偿系统校正负载三相不平衡的能力, 设置不平衡负载为: 三相有功负载设置为 4.84 kW; 感性无功负载情况为: A 相、B 相无功电流幅值为 10 A, C 相无功电流为 15 A, 三相电流不平衡度为 24.41%, 补偿前如图 13(a)所示, DT-STATCOM 补偿装置投入后, 电源侧三相电流不平衡度降低为 2.13%, 如图 13(b)所示。测试结果表明, DT-STATCOM 系统可以实现对负载三相不平衡的有效校正。

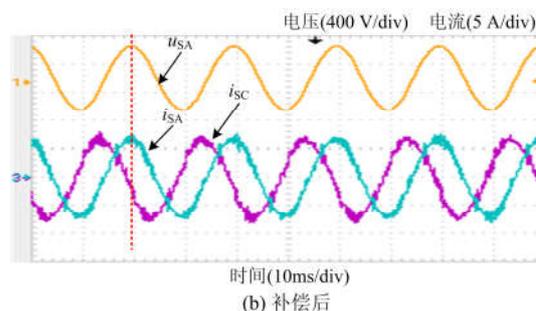
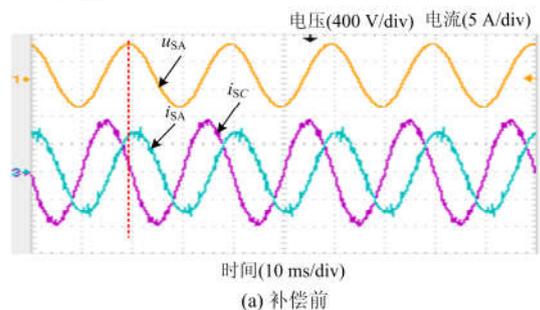


图 13 无功+不平衡综合补偿实验结果

Fig. 13 Experimental results of unbalanced and reactive current compensation

上述实验结果表明, 配电变压器集成化补偿系统具有良好的补偿效果和快速的动态响应。

6 结论

作为 DT-STATCOM 补偿的关键技术, 本文提出了基于动态权重优化的多目标综合控制策略, 通过仿真和动模实验进行了验证, 主要结论如下:

- 1) 在保证 DT-STATCOM 自身运行安全的前提下, 依据设备对无功、谐波、不平衡等的特定要求, 提出了基于动态权重分配的多目标综合补偿方法。
- 2) 根据多种补偿功能需求及跨变压器测控特点, 提出跨变压器的指令电流检测方法, 突破了补偿点和检测点位置不同的局限。
- 3) 提出基于非线性无源控制的无功电流跟踪策略, 增强了系统鲁棒性; 提出改进的双旋转坐标变换 PR 控制器, 实现典型谐波的选择性补偿; 提出了基于零序电压和负序电流注入的三相负载不平衡校正方法, 改善了不平衡补偿性能。

4) 通过仿真与动模实验, 验证了 DT-STATCOM 系统经配电变高压绕组抽头注入补偿电流具有良好的稳态补偿精度和快速的动态响应特性, 可实现配电网节能和电能质量的改善。

参考文献

- [1] 李辉, 马飞, 张浩, 等. 三相四线制 D-STATCOM/HES 系统在配电网中的应用及其仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(14): 107-114.
LI Hui, MA Fei, ZHANG Hao, et al. Research on the application and simulation of three phase four wire D-STATCOM/HES system in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(14): 107-114.
- [2] 李兰芳, 徐晓刚, 吴国兵, 等. 并联型 APF 直流侧电压的滑模 PI 控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(5): 32-37.

- LI Lanfang, XU Xiaogang, WU Guobing, et al. PI control based on sliding mode variable structure of DC-link voltage for shunt active power filter[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(5): 32-37.
- [3] Zhengming Li, Wenwen Li, Tianhong Pan. An optimized compensation strategy of DVR for micro-grid voltage sag. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 78-85. DOI: 10.1186/s41601-016-0018-9.
- [4] 郑诗程, 徐礼萍, 郎佳红, 等. 基于重复PI控制和前馈控制的静止无功发生器[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 219-225.
- ZHENG Shicheng, Xu Liping, LANG Jiahong, et al. Static var generator based on repetitive PI control and feedforward control[J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 2016, 31(6): 219-225.
- [5] 李静, 戴文战, 韦巍. 基于混合整数凸规划的含风力发电机组配电网无功补偿优化配置[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 121-129.
- LI Jing, DAI Wenzhan, WEI Wei. A Mixed Integer conconvex programming for optimal reactive power compensation in distribution system with wind turbines[J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 121-129.
- [6] 姚骏, 周特, 陈知前. 电网对称故障下定速异步风电场 STATCOM 容量配置研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(1): 45-54.
- YAO Jun, ZHOU Te, CHEN Zhiqian. Studies on STATCOM capacity configuration for FSIG-based wind farm under symmetrical grid fault[J]. Transactions of Chinese Electrotechnical Society, 2016, 31(1): 45-54.
- [7] 刘文华, 宋强, 张东江, 等. 50MVA 静止同步补偿器链节的等价试验[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 73-78.
- LIU Wenhua, SONG Qiang, ZHANG Dongjiang, et al. Equivalent tests of links of 50 MVA STATCOM[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 73-78.
- [8] 梁旭, 刘文华, 陈建业, 等. 基于多重化逆变器的静止无功发生器直流侧电流分析[J]. 电工技术学报, 2000, 15(1): 52-56.
- LIANG Xu, LIU Wenhua, CHEN Jianye, et al. Analysis of current on DC side of static var generator based on multi-inverter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 52-56.
- [9] 李旷, 刘进军, 魏标, 等. 静止无功发生器补偿电网电压不平衡的控制及其优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3): 58-63.
- LI Kuang, LIU Jinjun, WEI Biao, et al. Control and optimization of static var generator for grid voltage unbalance mitigation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3): 58-63.
- [10] 文蔚, 韩祯祥. 配电网无功补偿的动态优化算法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(10): 79-85.
- WEN Wei, HAN Zhenxiang. Dynamic reactive power optimization algorithm for distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(10): 79-85.
- [11] 熊卿, 张哲, 尹项根, 等. 新型配电变压器一体化 STATCOM 技术研究[J]. 电工技术学报, 2012, 27(10): 262-269.
- XIONG Qing, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. Research on integrated STATCOM technology of new distribution transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(10): 262-269.
- [12] Wang C, Yin X, Zhang Z, et al. A Novel Compensation Technology of Static Synchronous Compensator Integrated With Distribution Transformer[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(2): 1032-1039.
- [13] Chen Y, Luo A, Shuai Z, et al. Robust predictive dual-loop control strategy with reactive power compensation for single-phase grid-connected distributed generation system[J]. Iet Power Electronics, 2013, 6(7): 1320-1328.
- [14] Dehkordi N M, Sadati N, Hamzeh M. A Robust Backstepping High-Order Sliding Mode Control Strategy for Grid-Connected DG Units With Harmonic/Interharmonic Current Compensation Capability[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 561-572.
- [15] He J, Li Y W, Blaabjerg F, et al. Active Harmonic Filtering Using Current-Controlled, Grid-Connected DG Units With Closed-Loop Power Control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 29(2): 642-653.
- [16] Savaghebi M, Jalilian A, Vasquez J C, et al. Autonomous Voltage Unbalance Compensation in an Islanded Droop-Controlled Microgrid[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4): 1390-1402.
- [17] F. Nejabatkhah, Y. W. Li and B. Wu, et al. Control Strategies of Three-Phase Distributed Generation Inverters for Grid Unbalanced Voltage Compensation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 5228-524.
- [18] Alfonso-Gil J, Perez E, Arino C, et al. Optimization Algorithm for Selective Compensation in a Shunt Active Power Filter. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3351-3361.

- [19] Bhim Singh, Vishal Verma. Selective Compensation of Power-Quality Problems Through Active Power Filter by Current Decomposition[J]. IEEE Transactions on power delivery, 2008, (2): 792-799.
- [20] R. Xu, et al. A novel control method for transformerless h-bridge cascaded statcom with star configuration[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1189-1202.
- [21] Y. Gui, W. Kim and C. C. Chung, Passivity-based control with nonlinear damping for type 2 STATCOM systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(4): 2824-2833.
- [22] Lascu C, Asiminoaei L, Boldea I, et al. High Performance Current Controller for Selective Harmonic Compensation in Active Power Filters. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(5): 1826-1835.
- [23] 唐诗颖, 彭力, 康勇, 等. 并联有源滤波器广义积分控制设计新方法. 中国电机工程学报, 2011, (12): 40-45. TANG Shiyong, PENG Li, KANG Yong, et al. Novel Design Procedure of Generalized Integrators for Shunt Active Power Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, (12): 40-45.
- [24] Lee C, Wang B, Chen S, et al. Average Power Balancing Control of a STATCOM Based on the Cascaded H-Bridge PWM Converter With Star Configuration[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(6): 3893-3901.
- [25] 潘汉广, 王军, 宋勇辉. 多电平变换器补偿不平衡负载的应用分析. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 136-142. PAN Guanghan, WANG Jun, SONG Yonghui. Analysis of multilevel converters in compensating unbalanced load [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 136-142.
- [26] 毛彦辉, 夏明超, 李晓亮, 等. 负载不平衡下 D-STATCOM 控制策略的仿真研究. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 132-139. MAO Yanhui, XIA Mingchao, LI Xiaoliang, et al. Simulation study of the control strategy of D-STATCOM in compensating unbalance load[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 132-139.

收稿日期: 2017-09-11

作者简介:

尹项根(1954—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统继电保护与控制, 电力电子在电力系统中的应用; E-mail: xgyin@hust.edu.cn

王 祯(1994—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: wangzhen2016@hust.edu.cn

陈 玉(1990—), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力电子在电力系统中的应用及电力系统继电保护。E-mail: ChenYu_Huster@hust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)