

三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统在配电网中的应用及其仿真研究

李辉^{1,2}, 马飞¹, 张浩^{1,2}, 彭道刚^{1,2}

(1. 上海电力学院自动化工程学院, 上海 200090; 2. 上海发电过程智能管控工程技术研究中心, 上海 200090)

摘要: 针对配电网中存在谐波、无功以及负荷频繁波动等问题, 提出了含混合储能(HESS)的三相四线制配电网静止同步补偿器(D-STATCOM), 实现配电网无功补偿和谐波抑制, 平抑负荷有功功率波动。首先, 针对三相四线制配电网, 通过对传统 i_p-i_q 谐波电流检测方法改进, 实现了对负荷所需的有功、无功和谐波补偿电流的准确检测。在此基础上, 将超级电容器和铅酸蓄电池组成的混合储能系统引入到补偿装置中, 实现了对配电网有功、无功和谐波电流的全补偿。结合不同储能装置的充放电特性, 采用协调控制方法, 确保系统对配电网能量的迅速准确补偿。最后结合某建筑配电网实际负荷, 验证了三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统及其控制算法在谐波抑制、无功补偿和平滑负荷有功波动方面的有效性。

关键词: 三相四线制 D-STATCOM; 混合储能系统; 有功平滑; 无功补偿; 谐波抑制

Research on the application and simulation of three phase four wire D-STATCOM/HESS system in distribution network

LI Hui^{1,2}, MA Fei¹, ZHANG Hao^{1,2}, PENG Daogang^{1,2}

(1. College of Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. Shanghai Engineering Research Center of Intelligent Management and Control for Power Process, Shanghai 200090, China)

Abstract: Three phase four wire D-STATCOM system with HESS (D-STATCOM/HESS) is proposed to deal with the harmonic, reactive power, and load frequent fluctuation in distribution network to realize distribution network reactive power compensation and harmonic suppression and smooth load active power frequency fluctuation. Firstly, the traditional harmonic current detection method of i_p-i_q is improved to achieve an accurate detection of active and reactive power and harmonic compensation current on load. Secondly, due to the charge and discharge characteristics of lead-acid batteries and supercapacitors, coordination control method is employed to ensure distribution network energy compensated quickly and accurately. Finally, the three-phase four-wire D-STATCOM/HESS system and control algorithm are verified by the actual civil load distribution network circuit simulation. The system designed is shown effective in suppressing harmonics, reactive power compensation and smoothing fluctuations of the active power.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No.15ZR1417600) and Engineering Research Center of Shanghai Science and i_p-i_q Technology Commission Program (No. 14DZ2251100).

Key words: three phase four wire D-STATCOM system; HESS; active power smoothing; reactive power compensation; harmonic suppression

0 引言

近年来, 随着大量电力电子装置在配电网中的

广泛使用, 这些非线性、不平衡的负荷, 不仅使电网电压和电流发生畸变, 产生大量谐波, 而且会引起配电网三相电流不对称, 导致配电网中性点电压偏移, 使三相电压不对称。另外许多电力电子装置都需要消耗大量的无功功率, 这些无功功率不仅导致线路电压降低, 而且增加线路和设备损耗。上述问题已经严重地影响到配电网和用电设备的安全稳

基金项目: 上海市自然科学基金项目 (15ZR1417600); 上海市科学技术委员会工程技术研究中心项目 (14DZ2251100); 上海市国际科技合作项目 (15220710500)

定运行。

用于配电网的静止同步补偿器(D-STATCOM, Distribution STATic synchronous COMPensator)作为一种新型的无功补偿装置,具有自适应能力强,动作响应速度快,补偿效果好等特点,能够有效抑制配电网谐波电流,补偿负载无功功率是目前无功补偿装置研究和应用的热点。D-STATCOM 谐波抑制与无功补偿的核心是对补偿对象谐波、无功和不平衡电流进行准确的检测,目前主要的谐波检测方法有:模拟滤波器检测法、基于傅里叶分析检测法、基于瞬时无功功率理论检测方法、基于神经网络检测法,其中基于瞬时无功功率理论检测方法研究应用最多,根据日本学者赤木泰文的瞬时无功功率理论提出,称为 p-q 法^[1-3],在此基础上发展出根据瞬时有功电流和无功电流提出 $i_p - i_q$ 法^[4],此后又有学者提出针对三相四线制 p-q-r 法^[5]以及可检测任意次谐波电流的 $d_k - q_k$ 法^[6-7]等。

D-STATCOM 接入配电网也带来一些负面影响,其需要从电网吸收一定的有功功率来维持直流侧电压和输出电压的稳定,其不具备有功功率调节能力,这对于一些传输容量有限的配电网线路,在负荷高峰时段会影响配电网的安全、稳定运行。同时由于配电网中负荷种类颇多,存在一些反复短时工作负荷,其频繁启停会造成配电网有功功率频繁波动,影响系统的频率和电压稳定。目前,已有学者提出将储能装置应用于 D-STATCOM,这样含储能装置的 D-STATCOM 不仅可以实现对配电网谐波抑制和无功补偿,还可以在必要的时候向电网提供一定的有功功率,平抑负荷波动。文献[8-10]研究表明含储能 D-STATCOM 可以对提高电网暂态稳定性和改善电能质量。文献 [11-13] 将含储能 D-STATCOM 应用于风电场,研究结果显示其可以降低由于风力随机性和不确定性引起风电机组输出功率,提高风电场的电能质量和稳定性。但上述研究主要集中在大电网或风电场等三相三线制系统,而配电网大多使用三相四线制系统。同时,其主要考虑 D-STATCOM 对电网或风电场的有功和无功补偿,没有考虑谐波问题。最后在 D-STATCOM 配置储能时,大多采用单一储能方式,没有考虑不同储能装置的充放电特性对 D-STATCOM 工作性能的影响。

针对上述问题,本文提出了含混合储能系统(HESS, Hybrid Energy Storage System)的三相四线制 D-STATCOM 系统,文中简写为三相四线制 D-STATCOM/ HESS,实现配电网无功补偿和谐波抑制,平抑负荷有功功率波动。通过对传统 $i_p - i_q$ 谐波电流检测法改进,实现了对负荷所需的有功、无

功和谐波补偿电流的准确检测。同时,针对超级电容器和铅酸蓄电池不同的充放电特性,采用协调控制方法,确保系统对配电网能量的迅速准确补偿。最后,结合建筑配电网实际系统,通过仿真,验证了所提出的含混合储能(HESS)的三相四线制 D-STATCOM 在配电网中能较好抑制谐波和补偿无功,平抑负荷波动。

1 三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统拓扑结构及损耗分析

本文所提三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统拓扑结构如图 1 所示,主要由混合储能系统,直流侧电容、四桥臂逆变器、连接电抗等组成。图中混合储能系统与 D-STATCOM 直流侧电容并联,逆变器结构选用四桥臂拓扑结构^[14],该结构是在传统三相逆变器三桥臂结构的基础上再并联一组桥臂,其具有很强的补偿不平衡负荷电流、中线电流能力,同时装置的结构比较简单,经济性较高。逆变器主要功能是将直流电压变换为交流电压,而交流电压大小、频率和相位可以通过控制逆变器中可关断器件(如 GTO、IGCT、IEGT 等)的驱动脉冲进行控制。变流器直流侧电容不再作为储能电容使用,在电路中主要起滤波作用,其容量也相应减小很多。连接电抗 L 和电阻 R 代表线路损耗和逆变器的开关损耗,它们将三相四线制 D-STATCOM/HESS 装置并联到电力系统中,同时电抗器和电阻本身可以用于限制电流,防止逆变器故障或系统故障时产生过大的电流。

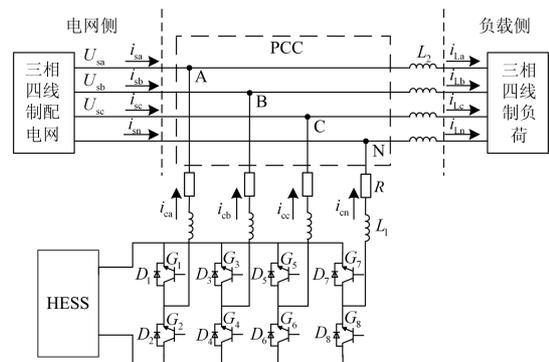


图 1 三相四线制 D-STATCOM/HESS 主电路结构图

Fig. 1 Main circuit diagram of D-STATCOM/HESS

D-STATCOM 装置的损耗是其应用的主要问题之一, D-STATCOM 装置的总损耗主要包括两部分:主电路损耗和辅助设备损耗^[15]。

辅助电路设备(监控保护设备、冷却设备、控制电路等)损耗只占 D-STATCOM 损耗的一小部分;主电路损耗是 D-STATCOM 装置损耗的主要部分。

主电路损耗可以分为连接电抗器损耗 P_L 、开关器件损耗 P_{IGBT} 和直流侧电容器损耗 P_c 。其中电容损耗 P_c 主要与直流侧电压波动有关, 本文中系统直流侧与 HESS 相联接, 电容电压相对稳定, 故电容器损耗 P_c 较小, 可近似忽略不计; 连接电抗器损耗与电抗器的等效电阻 R_L 有关; 开关器件损耗 P_{IGBT} 与开关器件的导通损耗、开通损耗和关断损耗有关, 需要考虑的因素众多, 求解公式复杂, 很难准确计算。综上, 装置的总损耗主要与电抗器损耗和开关器件损耗有关, 为简化分析和计算, 本文假设开关器件的损耗和连接电抗器的损耗用等效电阻 R 上的损耗表示, 则装置的总损耗可以由式(1)近似求得。

$$P = P_L + P_{IGBT} + P_c \approx (I_{c1}^2 + I_{c2}^2 + I_{c3}^2 + I_{cn}^2)R \quad (1)$$

2 三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统工作原理

三相四线制 D-STATCOM/HESS 在配电网中的主要作用抑制谐波、无功补偿及平抑负荷有功功率波动, 这些都是通过给配电网提供补偿电流实现的。而如何快速准确地补偿电网中的谐波、无功及有功电流, 最主要的就是补偿电流的计算和混合储能系统快速准确地充放电。

2.1 改进的 $i_p - i_q$ 补偿电流检测法

传统 $i_p - i_q$ 补偿电流检测方法主要用来检测电网谐波和无功电流, 并没有考虑有功电流。针对本文所提出的三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统, 对传统 $i_p - i_q$ 谐波电流检测法改进, 加入配电网有功电流补偿值的检测功能, 实现对配电网所需的有功、无功和谐波补偿电流的准确检测。

在三相四线制系统中, 由于单相不平衡负载的存在, 三相电流之和不为零, 系统中性线存在电流, 直接应用基于瞬时无功理论的 $i_p - i_q$ 法会造成零序电流补偿误差, 所以在进行补偿电流计算时, 先将零序电流从三相电流中解耦出来, 再使用改进的无锁相环 $i_p - i_q$ 补偿电流检测方法计算补偿电流。该方法对应的原理框图如图 2 所示。

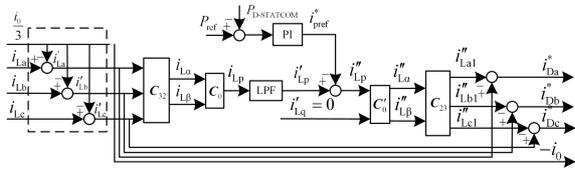


图 2 改进的无锁相环 $i_p - i_q$ 检测法原理框图

Fig. 2 Principle diagram of the improved $i_p - i_q$ method without PLL

图中的虚线框部分为零序电流解耦部分, 因为 a、b、c 三相负载电流中零序电流的相位和大小一致, 可求得各相所含零序电流 $i_{La0} = i_{Lb0} = i_{Lc0} = i_0/3$, 将各相负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 减去各相零序电流 i_{La0} 、 i_{Lb0} 、 i_{Lc0} , 得到零序电流解耦后的负载各相电流 i'_{La} 、 i'_{Lb} 、 i'_{Lc} , 其具体计算如式(2)所示。

$$\begin{aligned} i'_{La} &= i_{La} - i_{La0} \\ i'_{Lb} &= i_{Lb} - i_{Lb0} \\ i'_{Lc} &= i_{Lc} - i_{Lc0} \end{aligned} \quad (2)$$

无锁相环 $i_p - i_q$ 法通过将矩阵 $C_{2s/2r}$ 和 $C_{2r/2s}$ 中对应的 ω 设为一个定值 ω_0 , 使矩阵成为一个恒定的矩阵 C_0 和 C'_0 , 假设电网的频率为 f , 其对应的角频率如式(3)所示。

$$\omega = 2\pi f \quad (3)$$

我国的电网频率为 50 Hz, 因此可得 $\omega_0 = 314 \text{ rad/s}$, 如式(4), 负载侧电流 i'_{Labc} 经过 PARK 变换可得。

$$\begin{bmatrix} i_{Lp} \\ i_{Lq} \end{bmatrix} = C_{2s/2r} C_{32} \begin{bmatrix} i'_{La} \\ i'_{Lb} \\ i'_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} \sum_n \left\{ \begin{array}{l} I_{1n} \cos[(n\omega - \omega_0)t + \phi_{1n}] \\ -I_{2n} \cos[(n\omega + \omega_0)t + \phi_{2n}] \end{array} \right\} \\ -\sqrt{3} \sum_n \left\{ \begin{array}{l} I_{1n} \sin[(n\omega - \omega_0)t + \phi_{1n}] \\ +I_{2n} \sin[(n\omega + \omega_0)t + \phi_{2n}] \end{array} \right\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中

$$C_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C_0 = C_{2s/2r} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) & \sin(\omega_0 t) \\ -\sin(\omega_0 t) & \cos(\omega_0 t) \end{bmatrix} \quad (6)$$

i_{Lp} 和 i_{Lq} 经低通滤波器得直流分量 i'_{Lp} 、 i'_{Lq} 。

$$\begin{bmatrix} i'_{Lp} \\ i'_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{3} i_{1n} \cos[(n\omega - \omega_0)t + \phi_{1n}] \\ -\sqrt{3} i_{1n} \sin[(n\omega - \omega_0)t + \phi_{1n}] \end{bmatrix} \quad (7)$$

将直流分量代入式(8), 做 PARK 反变换可得负荷电流有功基波分量

$$\begin{bmatrix} i_{La1} \\ i_{Lb1} \\ i_{Lc1} \end{bmatrix} = C_{23} C'_0 \begin{bmatrix} i'_{Lp} \\ i'_{Lq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2}i_{11} \sin(\omega t + \phi_{11}) \\ \sqrt{2}i_{11} \sin(\omega t + \phi_{11} - 120) \\ \sqrt{2}i_{11} \sin(\omega t + \phi_{11} + 120) \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$C_{23} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{\frac{1}{2}} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$C'_0 = C_{2r/2s} = \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t) & -\sin(\omega_0 t) \\ \sin(\omega_0 t) & \cos(\omega_0 t) \end{bmatrix} \quad (10)$$

由式(8)可知,变换矩阵不影响基波有功电流的获取,仅在变换过程中起作用。

式(8)求得的是负载基波有功分量,并没有考虑对负载波动有功功率的补偿值计算。假设某时刻电网调度中心分配给某条配电网输出线路的有功功率为 P_{grid} , 某时刻配电网有功负荷为 P_{Load} , 当负载变化,导致 $P_{grid} \neq P_{Load}$ 时,由三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统来补偿这部分突变功率,故系统有功功率补偿值为: $P_{ref} = P_{grid} - P_{Load}$ 。如图 2 所示, $P_{D-STATCOM}$ 为补偿装置输出的有功功率, P_{ref} 为参考输出功率,为了实现无差调节,使用 PI 控制模块,将有功功率补偿值 P_{ref} 转换为有功电流补偿值 i_{pref}^* 。与 pq 坐标系中的基波有功电流 i'_{lp} 相减后,得到大电网所需要输送的基波有功电流 i_{lp}^* ,再经过 PARK 反变换后,即得到大电网输送的三相电流值 i_{La1}^* 、 i_{Lb1}^* 、 i_{Lc1}^* ,与经过零序电流解耦后的三相电流相减,即可得 D-STATCOM/HESS 系统 a、b、c 三相补偿电流参考值 i_{Da}^* 、 i_{Db}^* 、 i_{Dc}^* ,同时可得零线补偿电流 i_0^* ,其计算过程如式(11)所示。

$$\begin{aligned} i_a^* &= i'_{La} - i_{La1}^* \\ i_b^* &= i'_{Lb} - i_{Lb1}^* \\ i_c^* &= i'_{Lc} - i_{Lc1}^* \\ i_0^* &= (i_{La} + i_{Lb} + i_{Lc}) \end{aligned} \quad (11)$$

2.2 混合储能系统协调控制方法

为了降低负荷功率波动对配电网的影响以及避免负荷功率超出配线路容量出现的情况,利用混合储能系统,实现平抑负荷波动功率。本文并没有直接控制混合储能系统的充放功率,而是将逆变器输出功率与混合储能输出功率进行分开控制,逆变器向配电网输送功率时,会导致直流侧电容电压

变化。混合储能系统通过对电容进行充放电,稳定直流侧电容电压,从而间接实现混合储能系统对电网的充放电。具体的混合储能系统的结构如图 3 所示。铅酸蓄电池和超级电容器分别通过 DC/DC 电路与逆变器直流侧电容并联,这样可以通过分别对 DC/DC 的控制,达到分别控制铅酸蓄电池和超级电容器的目的。

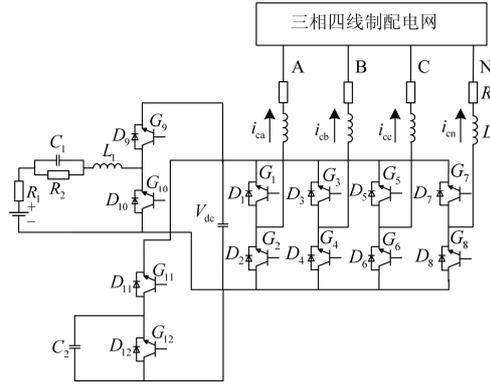


图 3 混合储能系统结构图

Fig. 3 Hybrid energy storage system structure diagram

由于混合储能系统中存在铅酸蓄电池和超级电容器两个不同的储能介质,需要针对各自充放特性,制定合理的协调控制方法,实现整个储能系统充放电指令跟踪误差最小。混合储能系统协调控制方法原理图如图 4 所示。

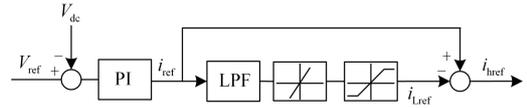


图 4 混合储能系统协调控制方法原理图

Fig. 4 Principle diagram of coordinated control method for hybrid energy storage system

图 4 中 V_{ref} 为直流侧电压参考值, V_{dc} 为直流侧电压实际值,通过 PI 控制器来稳定直流电压的恒定,经过 PI 控制器,电压指令转变为电流指令 i_{ref} ,并将其作为混合储能系统充放电电流指令。超级电容器具有功率大,容量小,循环寿命长,响应速度快等特点,由它承担充放目标值 i_{ref} 中的频繁波动部分,即图中的 i_{href} 。铅蓄电池具有容量大,功率密度小,循环寿命短等特点,由它承担充放目标值 i_{ref} 中的平滑部分,即 i_{Lref} 。

3 算例分析

3.1 算例和仿真电路介绍

本文利用 Matlab/simulink 仿真平台,验证三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统有效性,仿真参数

如表 1 所示。

表 1 仿真电路参数

Table 1 Simulation circuit parameters

参数名称	数值
系统线电压(RMS)	380 V
直流侧电容	0.04 F
直流侧电压	1 200 V
连接电感	0.001 7 H
电阻	0.01 Ω
铅酸蓄电池额定电压	800 V
铅酸蓄电池额定容量	300 Ah
超级电容器额定电压	800 V
超级电容器额定容量	100 Ah
HESS 控制系统比例、积分系数	$Kp: 5, Ki: 50$

仿真对象为某大厦供电系统。整栋大厦包括连续工作制负荷和反复短时工作制负荷。其中连续工作制负荷如照明、空调、风机等负载, 其有功功率 835 kW, 无功功率 1139 kvar, 反复短时工作制负荷如电梯, 水泵等, 其有功功率 260 kW, 无功功率 125 kvar。电网调度中心分配给配电网的有功功率为 835 kW。系统仿真模型如图 5 所示。

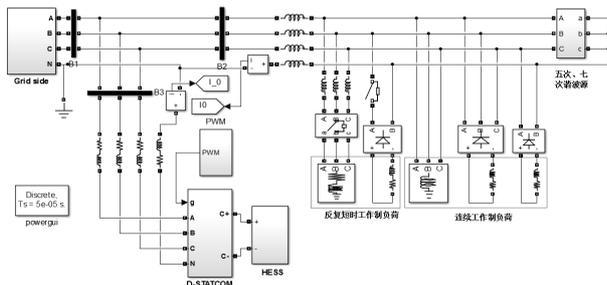


图 5 三相四桥制 D-STATCOM/HESS 工作系统仿真模型

Fig. 5 Simulation model of the three-phase four-wire D-STATCOM/HESS system

图 5 仿真模型包括三个方面: 大电网、配电网负载和三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统。仿真模型中通过三相不可控整流桥和单相不可控整流桥模拟负载谐波, 考虑到不可控整流桥主要产生五次谐波, 而实际负载还含有三次和七次谐波, 故在仿真模型中添加三次和七次谐波电流源。

图 6 为混合储能系统仿真模型, 铅酸蓄电池和超级电容器分别通过 DC/DC 电路并接到逆变器直流侧电容两端。

3.2 仿真结果与分析

图 7、图 8 分别为补偿前配电网电流波形和补偿后配电网电流波形。

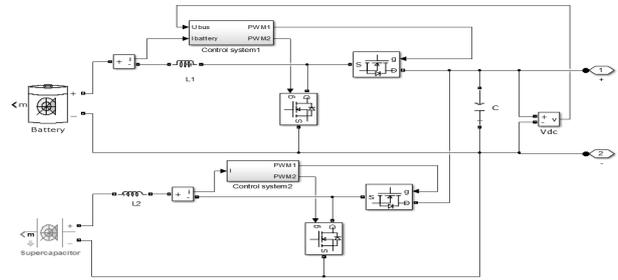


图 6 混合储能系统仿真模型

Fig. 6 Simulation model of HESS

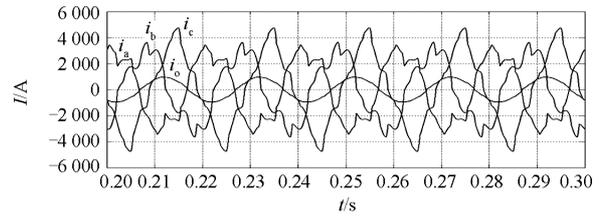


图 7 补偿前配电网电流波形

Fig. 7 Current waveform of distribution network before compensation

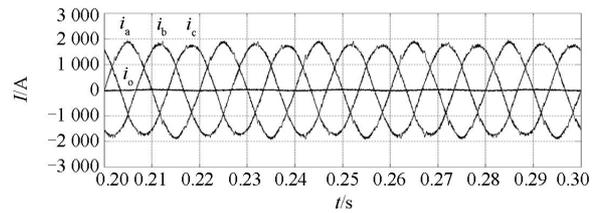


图 8 补偿后配电网电流波形

Fig. 8 Current waveform of distribution network after compensation

从图 7 中可以看出, 从 0~0.3 s, 在连续工作负荷正常时, 配电网三相负荷电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 发生严重畸变, 含有大量谐波, 同时三相负荷电流不平衡 $i_0 \neq 0$ 。图 8 为使用 D-STATCOM/HESS 系统后配电网电流波形, 从图中可以看出, 加入补偿装置后, 系统三相电流恢复恢复平衡, 零序电流降低到接近于 0。为了具体地说明配电网谐波电流在补偿前后的变化, 利用快速傅立叶分析补偿前后 A、B、C 三相各次谐波含有率(HRI)和总谐波畸变率(THD), 结果如表 2 所示。

从表 2 中可以看出补偿前负荷电流中含有较高的 3 次、5 次、7 次及 11 次谐波, 此时各相负荷电流总谐波畸变率(THD)分别为 28.74%、21.63%和 22.08%。补偿后, 配电网电流中含有率较高的 3 次、5 次、7 次及 11 次谐波含量均出现了明显地下降, 各相总谐波畸变率也分别下降到了 2.31%、1.56%和 2.47%, 均下降到 3%以下, 说明了本文所提出的系统可以有效地抑制电网谐波和补偿中性电流。

表 2 补偿前后各相电流总谐波畸变率表

Table 2 THD of current before and after compensation

谐波次数	A 相畸变	B 相畸变	C 相畸变	
	率/%	率/%	率/%	
补偿前	HRI_3	22.16	17.61	18.55
	HRI_5	11.66	9.51	10.18
	HRI_7	12.62	6.60	3.56
	HRI_{11}	4.72	3.63	3.65
	THD	28.74	21.63	22.08
补偿后	HRI_3	1.45	0.57	1.66
	HRI_5	0.95	0.99	1.38
	HRI_7	0.90	0.60	0.49
	HRI_{11}	0.52	0.40	0.54
	THD	2.31	1.56	2.47

表 3 所示为 D-STATCOM/HESS 系统与传统的 D-STATCOM/BESS 各相谐波抑制对比情况,除了 HESS 与 BESS 的区别外,这两种装置所采用的控制算法和硬件电路均相同。从表 3 中,可以看出,与采用 BESS 相比,采用 HESS 情况下,配电网各相谐波畸变率分别下降了 38.4%、50.3%、31.0%。可见 D-STATCOM/HESS 系统对配电网谐波的抑制效果更好。

图 9~图 12 为负载、配电网以及三相四线制 D-STATCOM/HESS 的功率曲线,HESS 充放电电流曲线。

在 0~0.4 s 配电网负载恒定不变时, D-STATCOM/HESS 向配电网注入 85 kW 有功功率和 1 245 kvar 无功功率。HESS 的放电电流保持在 300 A 左右。

表 3 D-STATCOM/BESS 与 D-STATCOM/HESS

补偿后各相电流总谐波畸变率表

Table 3 THD of current after the D-STATCOM/BESS and D-STATCOM/HESS compensation

谐波次数	A 相畸变	B 相畸变	C 相畸变	
	率/%	率/%	率/%	
BESS	HRI_3	1.80	0.93	1.58
	HRI_5	0.99	0.86	1.35
	HRI_7	0.96	0.66	0.41
	HRI_{11}	0.61	0.53	0.60
	THD	3.75	3.14	3.58
HESS	HRI_3	1.45	0.57	1.66
	HRI_5	0.95	0.99	1.38
	HRI_7	0.90	0.60	0.49
	HRI_{11}	0.52	0.40	0.54
	THD	2.31	1.56	2.47

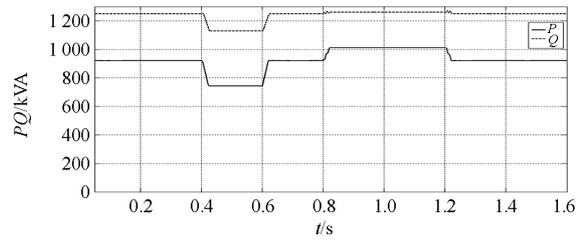


图 9 负载有功和无功功率曲线

Fig. 9 Curves of active and reactive power in load side

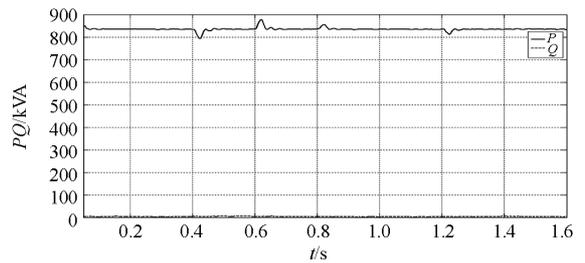


图 10 电网侧有功和无无功功率曲线

Fig. 10 Curves of active and reactive power in grid side

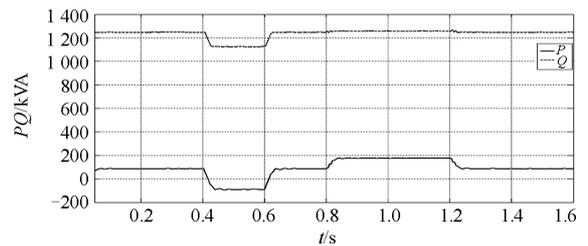


图 11 D-STATCOM/HESS 输出有功和无无功曲线

Fig. 11 Curves of active and reactive power in

D-STATCOM/HESS

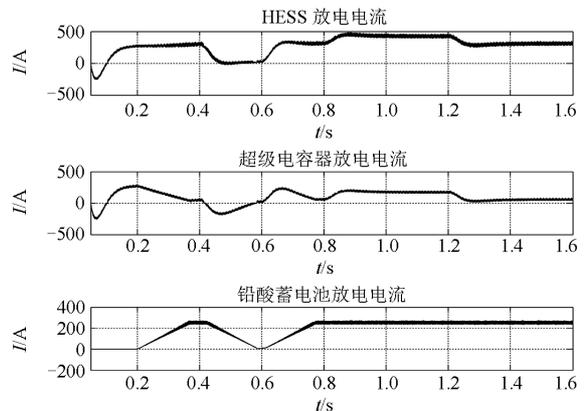


图 12 HESS 充放电电流曲线

Fig. 12 Charge and discharge current of HESS

三相对称负载在 0.4~0.6 s 从配电网切除,该负载有功功率 170 kW,无功功率 115 kvar。D-STATCOM/

HESS 由向配电网注入 85 kW 有功功率转为吸收 85 kW 有功功率, 注入无功功率从 1245 kvar 降到 1130 kvar, HESS 放电电流从 300 A 降低到 0 A, 其中超级电容器迅速响应, 在两个工频周期(40 ms)里从放电状态转换到充电状态, 放电电流从 50 A 转变为 -180 A, 后随着铅酸蓄电池放电电流减小而缓慢增加到 -10 A。铅酸蓄电池经过 9 个工频周期(180 ms) 放电电流从 250 A 降低到 10 A 左右。

单相负载在 0.8~1.2 s 并入微电网, 该负载有功功率 90 kW, 无功功率 10 kvar。D-STATCOM/HESS 向配电网注入有功功率和无功功率分别从 85 kW、1245 kvar 上升到 175 kW、1255 kvar。HESS 放电电流从 A 上升到 A, 同样超级电容器首先迅速响应, 在两个工频周期里(40 ms), 放电电流从 50 A 转变为 180 A。而铅酸蓄电池已达到最大放电电流 250 A, 故放电电流不变。

图 13 为系统在运行过程中, D-STATCOM 直流侧电压曲线, 从图中可以看出, 使用 HESS 的 D-STATCOM 系统直流侧电压在负荷发生变化时具有更快地响应速度, 如在 0.4~0.6 s 三相对称负载从配电网切除时, 使用 D-STATCOM/HESS 直流侧电压最大变化幅度为 50 V, 在经过 5 个工频周期恢复到额定值, 而 D-STATCOM/BESS 直流侧电压最大变化幅度为 100 V, 且在 10 个工频周期后都没有能够恢复到额定值, 由此可见在装置中采用 HESS 比 BESS 具有更快地响应速度和控制精度, 可以更好地稳定直流侧电压, 这也是 D-STATCOM/HESS 系统具有更好地抑制电压谐波效果的原因。

表 4 所示为 D-STATCOM 装置在不同工况下, 装置的损耗情况, 从表中可以知道装置的损耗与输出的无功功率呈正相关。这之前相关的研究文章^[15]的结论相吻合, 证明了仿真模型的准确性。

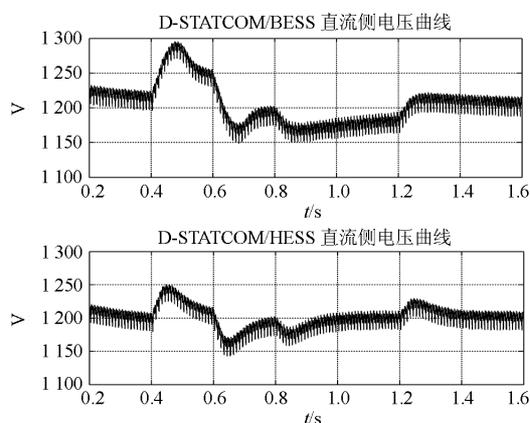


图 13 D-STATCOM 直流侧电压曲线

Fig. 13 Curves of DC current of D-STATCOM

表 4 不同工况下 D-STATCOM/HESS 功率损耗

Table 4 Different conditions of D-STATCOM / HESS

power loss		
仿真时间/s	输出无功/kvar	装置损耗/kW
0~0.4	1 245	110
0.4~0.6	1 130	89
0.6~0.8	1 245	110
0.8~1.2	1 255	113
1.2~1.6	1 245	110

综上, 仿真过程中, 虽然负荷发生短时波动, 但是大电网只需输出恒定的 835 kW 有功功率和 0 kvar 无功功率。负载所需的无功功率以及有功功率波动被 D-STATCOM/HESS 动态补偿, 且稳态误差为 0, 暂态响应时间约为两个工频周期(40 ms), 达到了预期目的。

4 结论

本文提出了应用配电网的三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统, 首先提出了针对三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统的改进无锁相环 $i_p - i_q$ 补偿电流检测法, 使装置不仅能够准确地补偿配电网所需的有功和无功电流, 而且实现了对配电网谐波电流的快速补偿, 降低了电网谐波和零序电流。同时通过将 HESS 引入到三相四线制 D-STATCOM 系统中, 在传统无功补偿的基础上实现了对配电网有功功率波动的平滑和谐波抑制, 而且通过采用混合储能系统协调控制方法, 结合超级电容器和铅酸蓄电池的各自优势, 提高了装置对配电网功率的补偿速度和精度。最后结合民用建筑中配电网实际负荷, 验证了三相四线制 D-STATCOM/HESS 系统及其控制算法在谐波抑制、无功补偿和平滑负荷有功波动方面的能力。

参考文献

- [1] 辛业春, 李国庆, 王尧, 等. 基于双 dq 坐标变换的三相电压锁相环的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(10): 114-118.
XIN Yechun, LI Guoqing, WANG Yao, et al. Study of three-phase voltage phase locked loop based on double dq transformation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(10): 114-118.
- [2] 马莉, 周景海, 吕征宇, 等. 一种基于 dq 变换的改进型谐波检测方案的研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(10): 55-58.
MA Li, ZHOU Jinghai, LÜ Zhengyu, et al. An improved harmonic detecting approach based on dq rotating coordination transformation[J]. Proceedings of the CSEE,

- 2000, 20(10): 55-58.
- [3] KUMAR P, SINGH A K, KUMMARI N K. pq theory based modified control algorithm for load compensating using DSTATCOM[C] // Proceedings of 2014 IEEE 16th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 2014: 591-595.
- [4] 王存平, 尹项根, 熊卿, 等. 一种改进的 ip-iq 无功电流检测方法及其应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 121-126.
WANG Cunping, YIN Xianggen, XIONG Qing, et al. An improved ip-iq reactive current detecting method and its application[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 121-126.
- [5] 刘开培, 陈艳慧, 张俊敏. 基于 p-q-r 法的电力系统谐波检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(14): 25-29.
LIU Kaipei, CHEN Yanhui, ZHANG Junmin. Harmonic detection method for power system based on p-q-r theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(14): 25-29.
- [6] 谢云至, 汪可友, 李国杰, 等. 不平衡情况下基于新型正负序分量检测的多电平逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(9): 74-80.
XIE Yunzhi, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Control strategy of multi-level inverter based on a new method for detecting positive and negative sequence components under unbalanced grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(9): 74-80.
- [7] 吕晓琴, 章春军, 张秀峰. 三相不对称系统任意次谐波电流检测新方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 93-96.
LÜ Xiaoqin, ZHANG Chunjun, ZHANG Xiufeng. A new algorithm for random harmonic current detection under unbalanced three phase system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 93-96.
- [8] 薛畅, 王建贇, 纪延超, 等. 结合蓄电池储能系统的 STATCOM 的电流解耦控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(6): 43-48.
XUE Chang, WANG Jianze, JI Yanchao, et al. Current decoupling control of STATCOM combined with battery energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(6): 43-48.
- [9] 范柱烽, 毕大强, 任先文, 等. 光储微电网的低电压穿越控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 6-12.
FAN Zhufeng, BI Daqiang, REN Xianwen, et al. Low voltage ride-through control of the photovoltaic/battery micro-grid system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 6-12.
- [10] ARULAMPALAM A, BARNES M, JENKINS N, et al. Power quality and stability improvement of a wind farm using STATCOM supported with hybrid battery energy storage[C] // Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings- IET, 2006, 153(6): 701-710.
- [11] LI N, LIU Y, WANG J, et al. Dynamic allocation method of DC side power based on the SoC of battery for STATCOM/BESS[J]. Electric Power Systems Research, 2015, 125: 141-149.
- [12] 吴杰, 孙伟, 颜秉超. 应用 STATCOM 提高风电场低电压穿越能力[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 47-51.
WU Jie, SUN Wei, YAN Bingchao. Improvement of low voltage ride through capability of wind farm using STATCOM[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 47-51.
- [13] CASTANEDA J, ENSLIN J, ELIZONDO D, et al. Application of STATCOM with energy storage for wind farm integration[C] // Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2010 IEEE PES. IEEE, 2010: 1-6.
- [14] 顾和荣, 王德玉, 沈虹, 等. 三相四桥臂逆变器控制技术[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 41-46.
GU Herong, WANG Deyu, SHEN Hong, et al. Research on control scheme of three-phase four-leg inverter[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 41-46.
- [15] 雷烈波, 李勇, 胡广振, 等. 高压大容量静止同步补偿器的优化节能运行[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 488-496.
LEI Liebo, LI Yong, HU Guangzhen, et al. Optimized energy-saving operation of high-voltage high-capacity STATCOM[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 488-496.

收稿日期: 2015-08-14; 修回日期: 2015-10-14

作者简介:

李辉(1979-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电、智能电网、电力系统稳定性等; E-mail: elmerlee@163.com

马飞(1990-), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制及稳定性;

张浩(1962-), 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为电力系统自动化、电站设备状态监测与故障诊断。

(编辑 张爱琴)