

基于 IGBT 三电平逆变器的 ± 100 kvar D-STATCOM

刘文华¹, 刘 炳¹, 王志泳¹, 卢军锋¹, 王京民²

(1. 清华大学电机系, 北京市 100084; 2. 石家庄国耀电子科技有限公司, 河北省石家庄市 050031)

摘要: D-STATCOM 是一种新型的用于配电网的动态无功补偿装置。文中介绍的 ± 100 kvar D-STATCOM 采用 IGBT 三电平逆变器实现, 启动采用直接并网方式, 脉冲调制采用特定谐波消除脉宽调制 (SHEPWM) 技术以消除逆变器输出电压的特定次数谐波, 控制器和脉冲发生器分别采用 TMS320C3X 数字信号处理器实现。试验表明, 该装置具有快速、连续地调节无功的能力和输出电流谐波含量低等优越性能。

关键词: D-STATCOM; 特定谐波消除脉宽调制; 三电平逆变器

中图分类号: TM761

0 引言

随着各种电子装置和精密设备的广泛应用, 用户对电能质量提出了越来越高的要求, 不仅要求供电连续可靠, 还希望供电电压、频率稳定, 波形良好。然而, 近几年来, 低压配电网的非线性、不对称及冲击性负荷迅速增多, 致使电网的电能质量恶化, 这将产生以下不利的影响:

- 非线性负荷产生的无功及谐波电流大量向中、高压配电系统渗透, 增加了系统的损耗。
- 不对称负荷加剧了电网的不平衡度。
- 快速冲击负荷 (如轧钢机、焊机、大型冲床等) 从电网吸收无功, 同时产生电压波动和闪变, 降低电动机的有效出力, 使产品成品率降低, 缩短设备使用寿命。

因此, 有必要对这些无功负荷进行就地补偿。传统的配电网无功补偿方式为投切电容器 (TSC) 或 SVC, TSC 输出无功不连续、不能吸收无功。而 SVC 和 TSC 都还有另外一个缺点, 即其输出无功与系统电压有关。当系统电压降低很多, 需要无功支持时, 输出无功反而会降低, 导致电压水平进一步恶化。

D-STATCOM 是一种新型的动态无功补偿装置, 即用于配电网的静止无功发生器。其输出无功与系统电压无关, 可在任何系统条件下提供无功支持, 快速进行无功补偿, 从而抑制电压闪变, 提高供电电压质量。采用特定的控制方式, 还可以消除谐波, 抑制系统相间不对称。因此, D-STATCOM 具有良好的工业应用前景。

1 D-STATCOM 主电路构成

三电平逆变器因其独特的性能而得到了广泛的应用。采用 IGBT 三电平逆变器的 ± 100 kvar D-STATCOM 主电路见图 1。装置采用直接并网启动方式, 并网无冲击电流。与传统的二电平逆变器相比, 三电平逆变器有以下优点: 首先, 每一个主管上承受的电压仅为直流侧电压的一半, 这样有利于提高装置的电压等级; 其次, 在同样的开关频率及控制方式下, 三电平逆变器输出电压和电流谐波小于二电平逆变器。

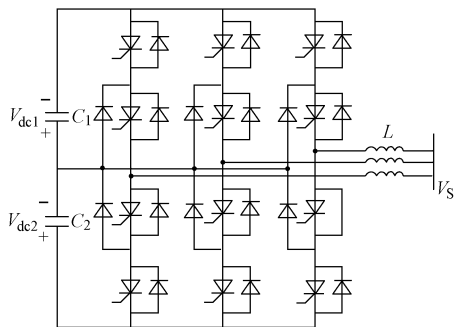


图 1 采用三电平逆变器的 D-STATCOM 主电路
Fig. 1 Main circuit of D-STATCOM employing tri-level inverter

主电路设计的关键是如何选择连接电抗 L 和直流电容 C 。

L 的取值对系统主要有以下 3 方面的影响:

- L 越大, 发出同量无功所需逆变器的输出电压越高, 系统的设计容量越大。为了降低 IGBT 和电抗器的成本, L 的取值越小越好。
- 从 D-STATCOM 的响应速度考虑, L 越小, D-STATCOM 的开环响应速度越快。

c. 在相同的逆变器输出电压谐波幅值的条件下, L 越大, 系统电流中的谐波电流越小。同理, 较大的 L 对 D-STATCOM 抵抗系统不对称比较有利。

本装置中电抗取 15%, 即 $L=0.7$ mH。

直流电容 C 的选择需要考虑以下几个因素:

a. 电容电压波动幅值。如果电容电压波动幅值过大, 不得不采用更高电压等级的电容、IGBT 和箝位二极管, 这势必会增加系统成本, 降低器件的使用效率和系统的可靠性。电容电压波动包含以下 3 部分: ①直流电压稳态波动, 这由系统电抗和电阻决定; ②理想情况下电容电压的 $3n$ ($n=1, 2, \dots$) 倍频电压波动, 其中最主要的是 3 次电压波动; ③系统电压中含有的谐波成分影响电容电压形成特定频率的电容电压波动^[1], 而较大的电容值有利于抑制电容电压波动。

b. 系统振荡对 C 的限制。不同的电容取值会在不同的频率使 D-STATCOM 产生振荡现象, 必须合理选取电容值以避免这种振荡现象^[2]。

c. D-STATCOM 输出电流中谐波含量的限制。

d. 应考虑电容电压波动对系统电流谐波含量的影响, 较大的电容有助于降低系统电流中的谐波含量。

总之, 选择较大的电容对系统性能是有利的。但是考虑到成本和装置本身空间的制约, 装置选取 $C=3\ 000\ \mu\text{F}$ 。仿真和实验表明, 此值可以满足上述要求。

另外, 根据系统损耗小于装置容量 5% 的要求, 还可以确定装置等值电阻 $r=0.074\ \Omega$ 。

由于

$$Q = \frac{3V_s^2}{r} \sin 2\delta \quad (1)$$

可见, 当系统电压变化时, D-STATCOM 可以通过快速改变 δ , 发出需要的无功, 稳定系统电压^[3]。

2 特定谐波消除脉宽调制技术

为了减少逆变器输出电压中的低次谐波含量, 采用了特定谐波消除脉宽调制 (SHEPWM) 技术^[4]。采用这种技术的逆变器输出相电压波形如图 2 所示, 其基本思路是在输出波形的特定位置设置一些缺口, 以获得所要求的谐波特性。

对 V_{ax} , V_{ab} 进行傅里叶分析, 其偶次项系数及余弦项的系数 a_n 均为 0, 于是相电压为:

$$V_{ax} = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t \quad (2)$$

线电压为 (图 2 中, 假定 $V_{dc1} = V_{dc2} = V_{dc}$):

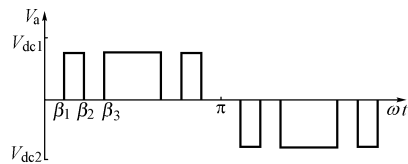


图 2 采用 SHEPWM 的逆变器输出相电压波形
Fig. 2 Phase voltage waveform of inverter using SHEPWM

$$V_{ab} = V_{dc} \sum_{n=1}^{\infty} b_n \left(\sin n\omega t - \sin n \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \right) \quad (3)$$

而由图 2 可见:

$$b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \sin n\omega t \, d(\omega t) = \frac{4}{n\pi} (\cos n\beta_1 - \cos n\beta_2 + \cos n\beta_3) \quad (4)$$

如果要消除相电压中的 n 次谐波, 只需令对应的 $b_n=0$, 按照求解方程得到的一组 β , 给出脉冲即可。假设相电压中设置的缺口数为 $2K$, 理论上就可以完全消除从 5 到 $6K+5$ 次谐波。这种方法同时会增加高次谐波的含量, 不能减小电压的总谐波失真。但是由于对应于高次谐波的阻抗较大, 所以可以明显地降低输出电流的谐波含量。图 3 是当相电压中设置 10 个缺口时, 输出无功为 100 kvar 时的 D-STATCOM 线电压和线电流的仿真波形, 从中可以清楚地看到这一点。

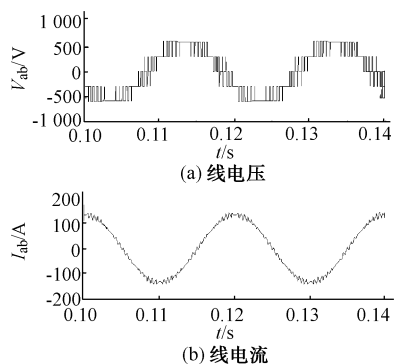


图 3 D-STATCOM 线电压及线电流仿真波形
Fig. 3 Simulated waveform of line voltage and current of D-STATCOM

3 D-STATCOM 控制及保护系统的设计

3.1 控制系统设计

控制系统是 D-STATCOM 的核心, 是实现其各种功能的关键。它必须满足控制速度快、脉冲角度精确、便于实现多种功能的要求^[5]。

依据上述要求设计了控制系统, 见图 4。硬件采用单片机加双 DSP 的多 CPU 结构, 其中 80C196 负

责人机接口的功能,一个 DSP(TMS320C31)负责脉冲的产生与发送,另一个 DSP(TMS320C32)负责数据采集、处理与控制,产生控制角 δ 去控制脉冲。3 个 CPU 之间的通信通过双口 RAM 来进行。双 DSP 的设计为系统留下了充分的裕量,为今后实现谐波治理、不对称抑制提供了条件。

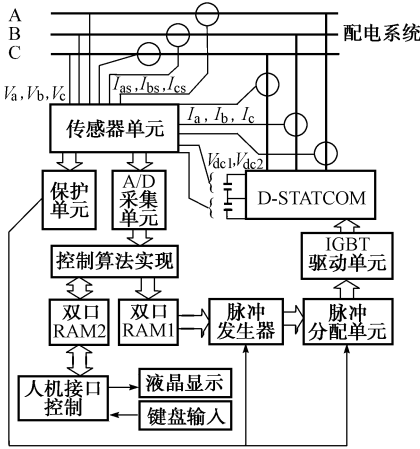


图 4 D-STATCOM 控制系统框图

Fig. 4 Diagram of controller of D-STATCOM

在控制算法上,应用了逆系统方法和瞬时无功理论^[6],而脉冲发生器则采用了 SHEPWM 技术^[4],两者的结合进一步改善了控制的效果。

D-STATCOM 采用了恒定无功及恒定电压控制方式。

图 5 给出了恒定无功方式下输出无功从 0 突变到 +100 kvar,再从 +100 kvar 突变到 0,再从 0 突变到 -100 kvar 时输出电压和电流波形。图 6 给出了恒定电压方式下系统电压设定从 380 V 突变到 395 V,再从 395 V 突变到 380 V,再从 380 V 突变到 365 V 时系统相电压和输出电流波形。

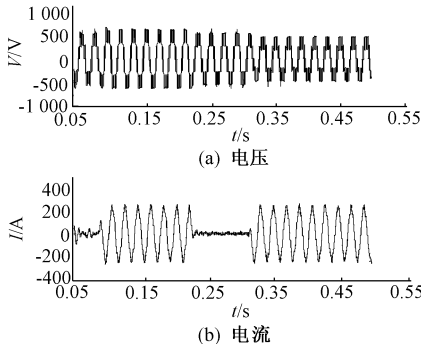


图 5 恒定无功控制下输出无功突变时的输出电压和电流波形

Fig. 5 Voltage and current waveforms in constant VAR control mode

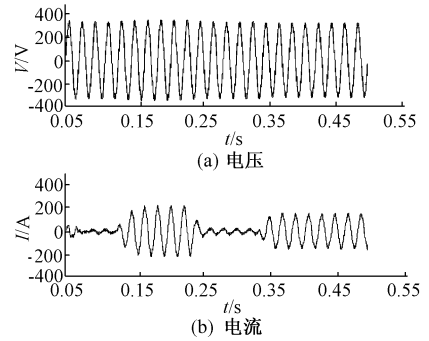


图 6 恒定电压控制下设定电压突变时的输出电压和电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms in constant voltage control mode

从仿真结果可以看出,D-STATCOM 具有快速的无功功率输出能力,输出无功响应时间小于 30 ms,可以有效抑制配电网冲击负荷引起的电压闪变,提供配电网功率因数,改善静态与动态电压质量。

3.2 保护系统的设计

为了保证 D-STATCOM 自身安全的前提下充分利用 D-STATCOM,我们设计了分级动作的保护系统,其中包含以下 3 个等级:

a. 软件保护。当 D-STATCOM 运行在 δ 过大或其他不正常状态下,而电流又没有超过保护动作的整定值,D-STATCOM 的控制器可以使它回到正常工作状态,避免 D-STATCOM 的硬件保护动作。

b. 脉冲封锁。如果 D-STATCOM 投入的系统危及自身安全,就必须采取脉冲封锁甚至跳闸保护。脉冲封锁保护动作的来源包括:软件保护脉冲封锁信号、A,B,C 相输出电流过流、电容电压过压与欠压、直流电容过流、系统过温、跳闸保护。

c. 跳闸保护。当 IGBT 处于故障状态时,保护系统会立即发出跳闸信号。跳闸后,必须手动合闸来使 D-STATCOM 重新投入运行。

4 D-STATCOM 试验结果

4.1 稳态试验结果

为了检验 D-STATCOM 的设计效果,我们对 D-STATCOM 进行了一系列试验。其中逆变器输出相电压中设置 2 个缺口,亦即希望消除输出中的 5, 7, 11 次谐波。图 7 和图 8 为录波波形。

在装置输出 60 kvar 无功时,对线电压及电流波形进行谐波分析,结果见表 1。

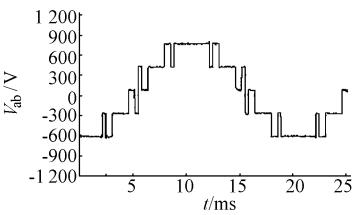


图 7 D-STATCOM 逆变器侧输出线电压波形
Fig. 7 Output line voltage waveform of inverter

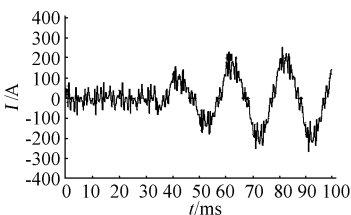


图 9 从 0 突变到+100 kvar 无功时的输出电流波形
Fig. 9 Output current waveform with step change from 0 to leading 100 kvar

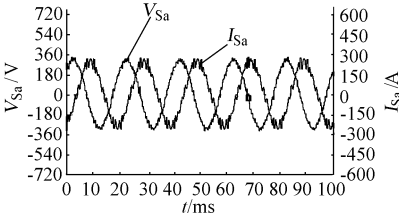


图 8 发 100 kvar 容性无功时的系统线电压和输出电流
Fig. 8 Line voltage and output current waveforms at leading 100 kvar

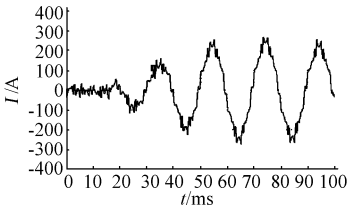


图 10 从 0 突变到-100 kvar 无功时的输出电流波形
Fig. 10 Output current waveform with step change from 0 to lagging 100 kvar

表 1 D-STATCOM 线电压、电流谐波分析
Table 1 Harmonic distortion of the output voltage and current

	3 次谐波	5 次谐波	7 次谐波	11 次谐波	总谐波失真 %
电压	0.7	0.9	1.1	0.3	23.6
电流	2.4	2.2	2.8	0.7	12.5

计算总谐波失真时,考虑了 3 次谐波至 31 次谐波,由于线电压中的谐波成分多数在 11 次以上,对应的谐波阻抗较大,因此线电流中的谐波含量得到了有效的抑制。提高 SHEPWM 脉冲的开口数,可进一步减小输出电流谐波。

4.2 动态试验结果

在配电网中,电压闪变是一种比较常见的电能质量问题,它的起因是负荷无功波动,其频率一般低于 30 Hz。要治理闪变,必须向系统注入与波动负荷幅值、波动频率一致的无功功率,这就要求装置输出无功功率的响应时间小于 30 ms。

图 9 给出了恒定无功控制下无功输出从 0 跳变到+100 kvar 时的电流波形。图 10 给出了恒定无功控制下无功输出从 0 跳变到-100 kvar 时的电流波形,从中可以看出,装置输出无功功率的响应时间小于 30 ms,这表明装置适用于配电系统负载的电压稳定控制。

试验结果表明,主电路的原理与设计、特定谐波消除算法的原理与脉冲发生器的设计正确可行。

5 结论

由于采用了三电平的拓扑结构和 SHEPWM 技

术,D-STATCOM 具有良好的输出谐波特性;在控制系统的设计中,逆系统方法和瞬时无功理论的应用,以及多 CPU 的硬件结构,使 D-STATCOM 有很高的响应速度;分级动作的保护系统也能够保证装置安全的前提下充分发挥 D-STATCOM 的功能。因此,它非常适用于提高配电网功率因数、改善配电网电压稳定度。试验结果证明了本文提出的设计方法的正确性,±100 kvar D-STATCOM 工业样机的成功研制为其工业化应用打下了良好的技术基础。

参 考 文 献

1 Ekanayake J B, Jenkins N. Selection of Passive Elements for a Three-level Inverter Based Static VAR Compensator. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999,14(2)

2 马晓军(Ma Xiaojun). 系统不对称对电压源逆变器的影响分析及不对称控制方法的研究:[博士学位论文](Research on the Behaviors and Control Strategies of Voltage Source Inverter Under Asymmetric Power System, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University),1998

3 刘文华(Liu Wenhua). 基于 GTO 的新型静止无功发生器的系统分析与参数设计:[博士学位论文](Systematic Analysis and Parameter Design of ASVG Based on GTO, Doctoral Dissertation). 北京:清华大学(Beijing: Tsinghua University), 1996

4 Ekanayake J B, Jenkins N. A Three-level Advanced Static VAR Compensator. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(1)

5 姜齐荣,刘文华,韩英铎,等(Jiang Qirong, Liu Wenhua, Han Yingduo, et al). ±20 Mvar STATCOM 控制器设计(Design of ±20 Mvar STATCOM Controller). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(23):24~28

