

基于GTO的48脉波100 MV·A UPFC研究

分析了UPFC调节电力系统线路潮流的工作机理、控制策略，给出了基于GTO的48脉波三电平NPC电压型变流器的主电路拓扑结构。以500 kV超高压骨干输电线路为工程背景，搭建了100 MV·A UPFC的Matlab仿真模型。结果表明UPFC装置可在半个周波时间内灵活快速控制线路潮流，显著改善电能质量。

马鸿文/中国矿业大学信息与电气工程学院



马鸿文/高级实验师

关键词/Keywords

UPFC ·
潮流控制 ·
GTO ·
48脉波 ·

统一潮流控制器（UPFC）是柔性交流输电系统家族中极具灵活性和应用价值的装置，它由两个背靠背并联和串联电压型变流器组成，其结构如图1所示。两个变流器共用一个直流母线和—个储能电容器。并联变流器通过与母线节点并联，能够独立向电网节点注入或吸收无功功率，起到静止无功补偿器（STATCOM）的作用，同时能够通过直流母线和串联变流器交换正向或反向有功功率。串联变流器通过变压器串联在输电线路中，给输电线路注入一个幅值和相位角均可控的电压矢量 U_{PQ} 实现潮流控制。串联变流器也可独立控制注入或吸收无功功率，但其转换到输电线路的有功功率是并联变流器通过直流母线传递过来的。总体来说，UPFC可以方便地控制输电系统电压、线路阻抗及相角三大参数。但UPFC的主要功能是并联变流器实现稳定母线电压、为串联变流器提供有功功率通路以及串联变流器实现潮流控制。为了减少补偿电流中的谐波含量，数百兆千伏安级别的UPFC通常以48脉波（即四重化三电平NPC中性点钳位）电路为电路拓扑。本文分析了UPFC潮流控制的工作原理、变流器的控制策

略以及四重化三电平NPC中性点钳位电路工作原理。以500 kV超高压骨干输电线路为工程背景，搭建了100 MV·A UPFC的Matlab仿真模型。结果表明UPFC装置可在半个周波时间内灵活快速控制线路潮流等，为UPFC的分析和设计应用提供了有效的研究手段。

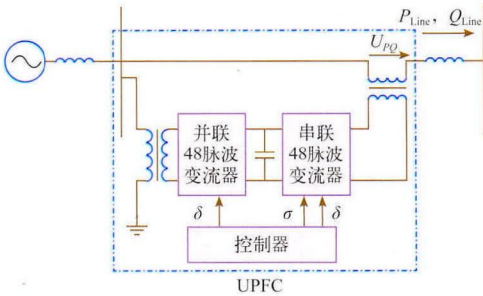
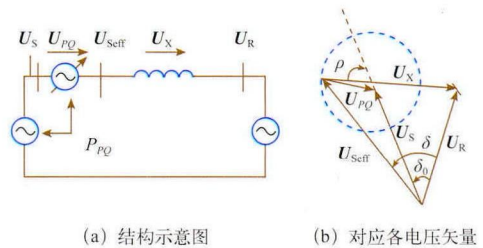


图1 UPFC结构

UPFC潮流控制机理

两母线系统如图2所示，说明UPFC潮流控制机理。由图2a可知，送端和受端母线电压为 U_S 、 U_R ；不考虑线路的有功损耗，线路等效电抗电压为 U_X ；串联变流器通过变压器注入电压 U_{PQ} ，图中标出各电压正方向。由图2b可知， U_S 、 U_R 初始相位差角为 δ_0 ，经UPFC补偿 U_{PQ} 后为 δ ； U_{PQ} 、 U_S 相位差角为 ρ ， $\rho \in (0, 2\pi)$ ；图中虚线圆示意为 U_{PQ} 最大幅值 U_{PQmax} 旋转一周的矢量轨迹。受端的潮



(a) 结构示意图 (b) 对应各电压矢量
图2 两母线系统

流即输送功率 P 和受端提供的无功功率 $-jQ_R$ 之和为

$$P - jQ_R = U_R I^* = \left(\frac{U_X + U_{PQ} - U_R}{jX} \right)^* = \left(\frac{U_X - U_R}{jX} \right)^* + \left(\frac{U_{PQ}}{jX} \right)^* \quad (1)$$

式中, $*$ 为共轭复数; $j = e^{j\pi/2} = \sqrt{-1}$ 。

假设 $U_S = U_R = U$, 考虑到关系式

$$\begin{cases} U_S = U e^{j\delta/2} = U \left(\cos \frac{\delta}{2} + j \sin \frac{\delta}{2} \right) \\ U_R = U e^{-j\delta/2} = U \left(\cos \frac{\delta}{2} - j \sin \frac{\delta}{2} \right) \\ U_{PQ} = U_{PQ} e^{j(\delta/2 + \rho)} = U_{PQ} \left[\cos \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) + j \sin \left(\frac{\delta}{2} + \rho \right) \right] \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)代入式(2)得

$$\begin{cases} P(\delta, \rho) = P_0(\delta) + P_{PQ}(\rho) = \frac{U^2}{X} \sin \delta - \frac{U U_{PQ}}{X} \sin(\delta + \rho) \\ Q(\delta, \rho) = Q_0(\delta) + Q_{PQ}(\rho) = \frac{U^2}{X} (1 - \cos \delta) - \frac{U U_{PQ}}{X} \sin(\delta + \rho) \end{cases} \quad (3)$$

其中

$$\begin{cases} P_0(\delta) = \frac{U^2}{X} \sin \delta \\ Q_0(\delta) = \frac{U^2}{X} (1 - \cos \delta) \end{cases} \quad (4)$$

式(3)为系统UPFC作用时的潮流值; 式(4)为系统UPFC不作用时的潮流值。

设电压 U 、电抗 X 的标幺值为1, 由式(4)可得标幺值形式为

$$[Q_0(\delta) + 1]^2 + [P_0(\delta)]^2 = 1 \quad (5)$$

式(5)表示为图3中 PQ 坐标系下系统UPFC不作用时潮流值 P 及 Q 的关系, 即以 $(0, -1)$ 为圆心的圆, 图中只表示 P 取正值的1/4圆, 该圆上的每一点对应在给定 δ 下系统UPFC不作用时的潮流

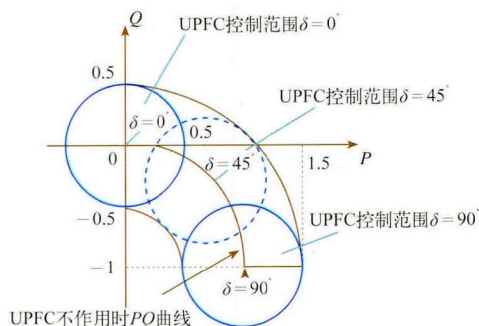


图3 UPFC潮流控制范围示意图

值。如 $\delta = 0$, $P = 0$, $Q = 0$; $\delta = 45^\circ$, $P = 0.707$, $Q = 0.293$; $\delta = 90^\circ$, $P = 1$, $Q = 1$ 等。

因为 $|U_{PQ}| \leq U_{PQ\max}$, 设 $U_{PQ\max}$ 的标幺值为0.5, 由式(3)可得

$$[P(\delta, \rho) - P_0(\delta)]^2 + Q^2(\delta, \rho) \leq (0.5)^2 \quad (6)$$

式(6)为图3中 PQ 坐标系下系统有补偿 U_{PQ} 的潮流值 P 及 Q 控制范围公式。在给定 δ 下潮流控制范围是以 $[P_0(\delta), Q_0(\delta)]$ 为圆心的圆。

图3已给出 $\delta = 0^\circ$ 、 $\delta = 45^\circ$ 和 $\delta = 90^\circ$ 对应的圆周控制范围。即当给定传输角 δ 为一定值时, 潮流控制的区域是 U_{PQ} 在 $\rho \in (0, 2\pi)$ 范围内以最大幅值 $U_{PQ\max}$ 旋转一周形成的。

48脉波变流器主电路

基于GTO的48脉波并联和串联变流器主电路结构如图4a所示, 它由4个三电平NPC型逆变器单元电路($INV_1 \sim INV_4$)和4台移相变压器($T_1 \sim T_4$)组成。4个逆变器触发脉冲依次相位移为 7.5° 、 -22.5° 、 -7.5° 和 -37.5° ; 4台移相变压器联结组别为 $Z/Y-0$ 、 $Z/D-11$ 、 $Z/Y-0$ 和 $Z/D-11$ (Z 、 Y 和 D 表示曲折联结、星形联结和三角联结), 相位移为 7.5° 、 -22.5° 、 -7.5° 和 -37.5° 。4台变压器一次侧串联, 叠加后的电压为48脉波的正弦电压。

每个逆变器输出的 n 次谐波含量为 $n = 12k \pm 1$ ($k \in N$), 即12脉波变流器, 设输出相电压幅值为 U_m , 基波角频率为 ω 。 INV_1 和 INV_3 相位移 15° , 即 $\pi/12$, 其对应的变压器也彼此相位移 15° , 从而通过变压器耦合叠加后构成24脉波变流器, 谐波次数为 $24k \pm 1$ ($k \in N$)。输出相电压如式(7)所示。 INV_2 和 INV_4 相位移 15° , 其对应的变压器也彼此相位移 15° , 从而通过变压器耦合叠加后构成另一24脉波变流器。两组24脉波变流器以一组24脉波变换器为基准, 将另一组24脉波变换器的触发脉冲整体滞后 7.5° , 即 $\pi/24$, 同时使两组变压器绕组间提供 7.5° 的相位移, 则两个24脉波合成叠加为48脉波变流器。输出电压如式(8)所示, 即输出电压为48脉波的正弦电压。谐波依次为47、49、95和97等。

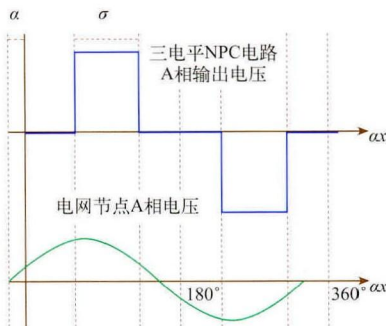
$$U_{\text{out}(24\text{-pulse})} = U_m (\cos \omega t + \sum_{n=12k \pm 1, k \in N}^{\infty} \pm \frac{1}{n} \cos n\omega t) + U_m \left\{ \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{12} + \frac{\pi}{12} \right) + \sum_{n=12k \pm 1, k \in N}^{\infty} \pm \frac{1}{n} \cos \left[n \left(\omega t - \frac{\pi}{12} \right) \pm \frac{\pi}{12} \right] \right\}$$

$$= 2U_m (\cos \omega t + \sum_{n=24k \pm 1, k \in N}^{\infty} \pm \frac{1}{n} \cos n\omega t) \quad (7)$$

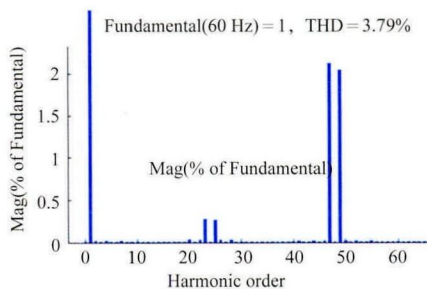
$$U_{\text{out}(48\text{-pulse})} = 2U_m (\cos \omega t + \sum_{n=24k \pm 1, k \in N}^{\infty} \pm \frac{1}{n} \cos n\omega t) + 2U_m \left\{ \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{24} + \frac{\pi}{24} \right) + \sum_{n=24k \pm 1, k \in N}^{\infty} \pm \frac{1}{n} \cos \left[n \left(\omega t - \frac{\pi}{24} \right) \pm \frac{\pi}{24} \right] \right\}$$

$$= 4U_m (\cos \omega t + \sum_{n=48k \pm 1, k \in N}^{\infty} \pm \frac{1}{n} \cos n\omega t) \quad (8)$$

图4b为单元电路；图4c为控制示意图。图4c上图为三电平NPC型逆变器单元电路A相输出电压波形，三电平输出即 U_{dc} 、0和 $-U_{dc}$ ；图4c下图为电网节点A相电压波形。控制 α 角即是控制48脉波三电平NPC电压型变流器输出电压与参考电压的移相相位；控制 σ 角即是控制48脉波三电平NPC电压型变流器输出电压的幅值。从分析可知，UPFC并联变流器控制策略为调节 α 角，控制 σ 角固定为 172.5° ；UPFC串联变流器控制策略为同时调节 α 角和 σ 角，控制相位和幅值。图4d显示在Matlab平台上搭建基于GTO的48脉波STATCOM主电路模型。通过软件Powergui模块FFT分析功能，对 $\alpha=0^\circ$ 、控制角 $\sigma=172.5^\circ$ 时的输出相电压波形进行频谱分析。结果显示基波为60 Hz，对应基值为100%（图



(c) 控制示意图



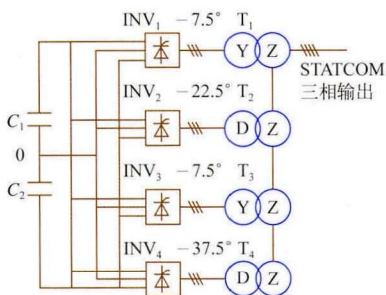
(d) 输出电压FFT分析

图4 48脉波STATCOM主电路、单元电路、控制示意图和输出相电压FFT分析示意图

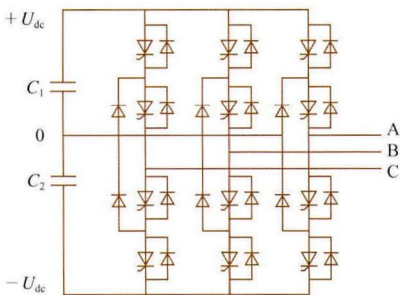
中为了清楚地显示23、25、47和49等次的谐波含量，纵轴坐标只绘制到2%），电压谐波总畸变率THD为3.79%，远低于国家规定的5%水平。23次谐波和25次谐波含量降低至0.3%以下，47次谐波和49次谐波含量降低为2%左右。

UPFC控制策略

本文主要分析的是UPFC对线路中的潮流控制策略，此处采用空间旋转矢量概念。在三相静止坐标系中，三相对称电量（如电压、电流）和在任意时刻为0，均可用以 $\omega=2\pi f$ 为角频率旋转的空间矢量表示 $\mathbf{U}$ 、 $\mathbf{I}$ 。然后对其在同样以 $\omega=2\pi f$ 为角



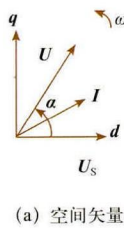
(a) 主电路



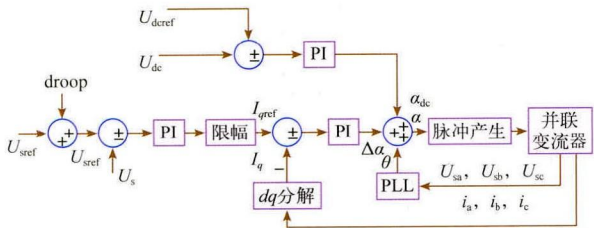
(b) 单元电路

频率旋转的两相正交的dq坐标系中分解为d轴和q轴分量，如 U_d 、 U_q 、 I_d 和 I_q ，即进行Park变换。本文在图2所示的两母线系统中将d轴定位在 U_s 上，其旋转角度 $\theta = \int_0^t \omega dt$ 可通过锁相环来同步获得。

图5a、b为UPFC并联变流器的空间矢量和控制框图。UPFC并联变流器采用直接相角（即间接电流）控制策略，控制图5b为了稳定母线电压。实际测得的母线电压和考虑droop的参考母线电压的偏差 ΔU 经PI调节得到 I_{qref} ($I_{qref} \propto Q \propto \Delta U$)，根据锁相环获得系统母线电压 U_s 的相角 θ ，采集的三相电流通过Park变换得到实际的 I_q ，并与参考的 I_{qref} 进行比较得到的偏差经PI调节后为图5b所示的角度 $\Delta\alpha$ ，其目的是为了调节直流母线电压并使之恒定，且用来平衡串联变流器需要的功率要求。通过实际测得的直流母线电压和参考直流母线电压的偏差经PI调节得到 α_{dc} 。锁相环获得的系统母线电压 U 的相角 θ 、 $\Delta\alpha$ 和 α_{dc} 三者之和即为直接相角 α 驱动GTO的48脉波三电平NPC电路的触发，并联合变流器的输出电压幅值不变。



(a) 空间矢量

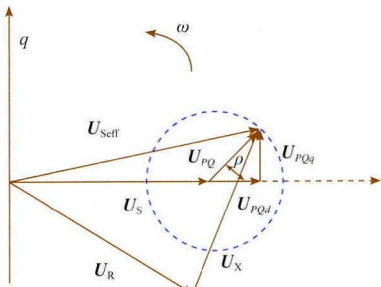


(b) 控制框图

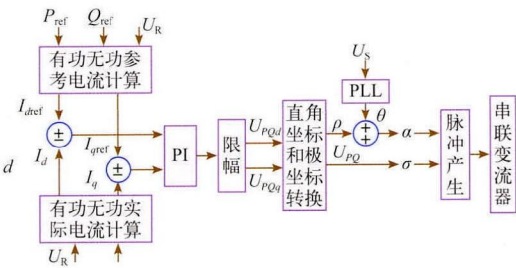
图5 UPFC并联变流器的空间矢量和控制框图

图6a、b为UPFC串联变流器的空间矢量和控制框图。UPFC串联变流器采用直接电流控制，通过给定的线路潮流控制 P_{ref} 、 Q_{ref} 及系统的电压，计算出串联部分实际输出的电流参考 I_{dref} 和 I_{qref} ，采集的三相电流通过Park变换得到实际的 I_d 和 I_q ，实际的 I_d 和 I_q 与参考的 I_{dref} 和 I_{qref} 进行比较得到偏差经PI调

节后计算出串联部分实际应输出的电压 U_{PQ} 的分量（直轴分量 U_{PQd} 和交轴分量 U_{PQq} ）。经过直角坐标到极坐标的变换，得到 U_{PQ} 的幅值和相角。根据锁相环获得的系统母线电压 U 和相角 θ ，换算出到图4c的 α 角和角 σ 驱动GTO48脉波三电平NPC电路的触发，更新串联变流器的输出电压幅值和相角，从而跟踪参考潮流 P_{ref} 、 Q_{ref} 。为了防止串联变流器出现超限过补偿现象，控制框图中对 U_{PQ} 增加了幅值限制。



(a) 空间矢量



(b) 控制框图

图6 UPFC串联变流器的空间矢量和控制框图

系统Matlab仿真

1. 系统描述

500 kV超高压环形输电系统如图7所示。它由等效电源、负荷、UPFC和环形输电线组成。节点B₁处有等效电源 U_{S1} （短路容量8 500 MV·A，电压500 kV，内阻抗为 $R=2.94 \Omega$ 、 $L=0.078 H$ ），300 MW的有功负荷load₁，100 MV·A的UPFC。节点B₃处接有等效电源 U_{S2} （短路容量6 500 MV·A，电压500 kV，内阻抗比 $X/R=8$ ），200 MW的有功负荷load₂。节点B₄处接有等效电源 U_{S3} （短路容量9 000 MV·A，电压500 kV，内阻抗比 $X/R=10$ ）。节点B₁、B₃和B₄连有环形输电线L1（200 km）、L2（75 km）和L3（180 km），输电线的集中等效电

阻、电感和电容正序参数为 $0.012\ 73\ \Omega/\text{km}$ 、 $0.93\ \text{mH}/\text{km}$ 和 $12.74\ \text{nF}/\text{km}$ 。

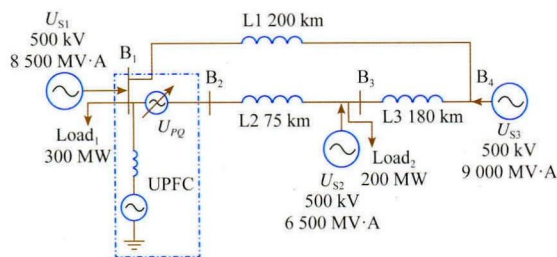


图7 500 kV超高压环形输电系统

2. 潮流控制仿真结果

分析可知, 当各母线电源稳定、UPFC不作用时, L2输电线路流向节点B₃的自然潮流为 $P=870\ \text{MW}$ ($8.7\ \text{pu}$), $Q=-60\ \text{Mvar}$ ($0.6\ \text{pu}$)。当UPFC起作用且在 $t=0.3\ \text{s}$ 时, 设定 $P_{\text{ref}}=1\ 000\ \text{MW}$ ($10\ \text{pu}$); 在 $t=0.6\ \text{s}$ 时, 设定 $Q_{\text{ref}}=80\ \text{Mvar}$ ($0.8\ \text{pu}$)。观察系统潮流阶跃响应 (仿真时间 $1\ \text{s}$) 如图8所示。

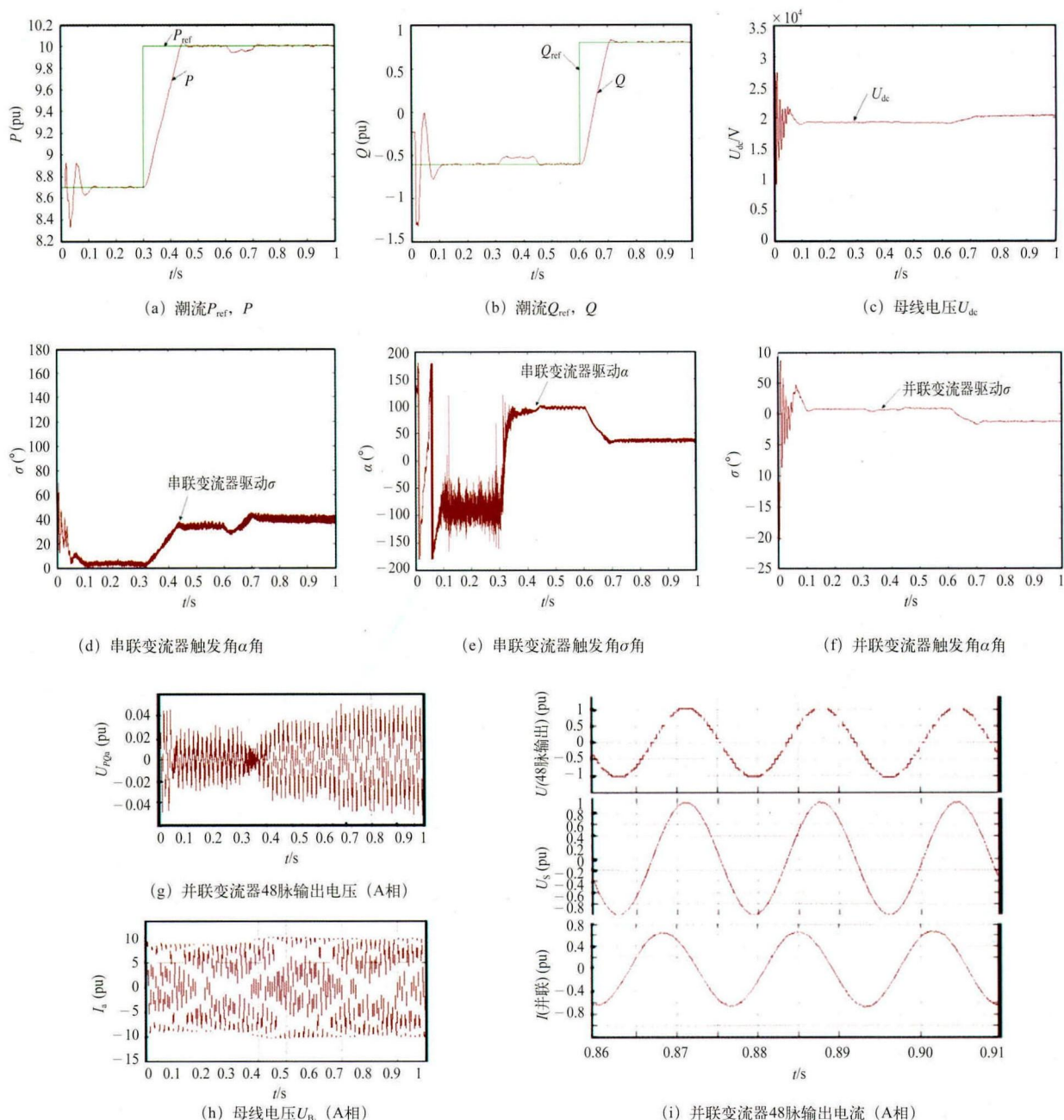


图8 各电量仿真波形

图8a~c分别为0~1 s时间输电线L2的给定潮流 P_{ref} 和 Q_{ref} 、实际潮流 P 和 Q 以及直流母线电压 U_{dc} 波形曲线。可以观察到,UPFC对潮流的阶跃响应反应时间在0.1 s(即半个周波)内快速控制潮流而且稳定纹波较小。直流母线电压 U_{dc} 能保持恒定在 $U=20\,000\text{ V}$,证明了控制策略的有效性和正确性。

图8d~f分别为0~1 s时间UPFC串联变流器控制触发角 α 角和 σ 角、并联变流器控制触发角 α 角波形曲线。串联变流器控制触发角 α 角反映 U_{PQ} 与母线节点电压 U_{B_1} 的相位差,跟随给定潮流 P 和 Q 改变,在0.3 s和0.6 s均有突变。串联变流器控制触发角 σ 角反映 U_{PQ} 的幅值,随着 P 、 Q 阶跃给定, σ 角变大, U_{PQ} 的幅值增加。

图8g、h分别为0~1 s时间UPFC串联变流器注入的电压(A相)、输电线L2的电流(A相)波形曲线。UPFC串联变流器注入的电压(A相)幅值与串联变流器控制触发角 σ 角趋势一致。随着 P 、 Q 阶跃给定, σ 角变大, U_{PQ} 的幅值增加。

图8i为0.86~0.91 s时间UPFC并联变流器48脉

输出电压(A相)、母线电压 U_{B_1} (A相)和UPFC并联变流器输出电流(A相)波形曲线。观察为UPFC并联变流器输出电压(A相)48脉近似正弦波与母线电压 U_{B_1} (A相)波形幅值、频率一致,有相位差。

UPFC并联变流器输出电流(A相)波形超前母线电压 U_{B_1} (A相),说明在0.86~0.91 s范围内UPFC并联变流器补偿容性电流。

结束语

本文介绍了基于GTO的48脉波大容量UPFC潮流控制的工作原理,分析了主电路减少谐波的机理以及UPFC并联变流器直接相角控制和串联变流器直接电流控制的控制策略。以500 kV超高压骨干电网为工程背景,基于Matlab仿真平台搭建了100 MV·A的UPFC的仿真模型。结果表明UPFC装置可在半个周波时间内灵活快速控制线路潮流,显著改善电能质量。

(收稿日期:2014-12-03) EA

大窗显示直观
增大、中置的状态显示窗,提高了状态窗口的可视性。

快速通信安装
采用直插式联接方式的通信触点能实现快速接线,并提供可靠的信号传输。

便捷快速安装
优化的卡导轨装置,无需工具的帮助即可进行安装和拆卸。

旋转方便布线
根据IEC 62305标准,电涌保护器的接线需遵循50cm法则。180°底座旋转功能便于布线以满足标准的要求。

锁紧彻底抗振
保护插头卡入底座上会有声音提示。此设计适合于抗振性能要求高的应用场所,比如风电行业。

Weidmüller

魏德米勒VPU系列电涌保护器 — 低压供电系统的升级版电涌保护卫士

魏德米勒VPU系列电涌保护器用于低压供电系统,符合2012年IEC/EN 61643-11国际标准,为您提供持久、安全、前瞻性的雷电和浪涌保护解决方案,并简化维修。

魏德米勒电联(上海)有限公司
电话: 86 21-22195008 网址: www.weidmueller.com.cn

