

(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 102842909 A

(43) 申请公布日 2012. 12. 26

(21) 申请号 201210336074. 3

(22) 申请日 2012. 09. 12

(71) 申请人 湖南大学

地址 410082 湖南省长沙市岳麓区麓山南路
2 号

(72) 发明人 帅智康 涂春鸣 盘宏斌 姚鹏
蒋玲 戴晓宗 楚焱 肖凡 张杨

(74) 专利代理机构 长沙正奇专利事务所有限责
任公司 43113

代理人 马强

(51) Int. Cl.

H02J 3/01 (2006. 01)

H02J 3/18 (2006. 01)

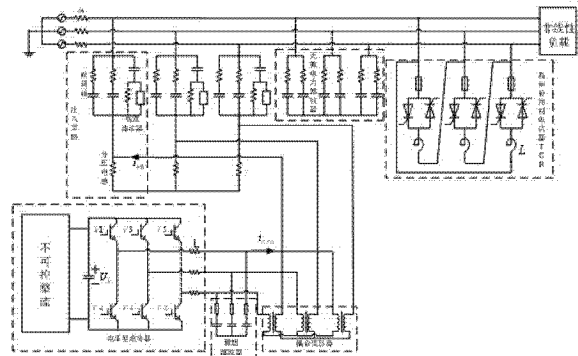
权利要求书 2 页 说明书 7 页 附图 3 页

(54) 发明名称

一种电力电子混合系统控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种电力电子混合系统控制方法,包括电力电子混合控制系统,电力电子混合控制系统包括有源电力滤波器、静止无功补偿器,所述静止无功补偿器包括无源电力滤波器组和晶闸管控制电抗器,有源电力滤波器、无源电力滤波器组、晶闸管控制电抗器依次并接入电网和与电网连接的负载之间,通过无源电力滤波器和有源电力滤波器的联合使用,进行高压母线的谐波抑制,通过静止无功补偿器进行无功补偿,实现了延时补偿和在线控制,提高了控制精度,并改善了跟踪性能,降低了电网的电能损耗,净化了电网污染。



1. 一种电力电子混合系统控制方法,包括电力电子混合控制系统,电力电子混合控制系统包括有源电力滤波器、静止无功补偿器,所述静止无功补偿器包括无源电力滤波器组和晶闸管控制电抗器,有源电力滤波器、无源电力滤波器组、晶闸管控制电抗器依次接入电网和与电网连接的负载之间,其特征在于,所述电力电子混合系统控制方法包括有源电力滤波器控制方法和静止无功补偿器控制方法:

所述有源电力滤波器控制方法包括以下步骤:

检测负载电流 I_{La} 、 I_{Lb} 、 I_{Lc} ,有源电力滤波器实际注入到三相电网中的电流 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} ,计算负载谐波电流 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} ;

利用 π -史密斯预测器对系统进行 e^{T-s} 的延时补偿,使得 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} 与 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} 之间相位差为 180° ;

使用 PI 控制器调节负载谐波电流 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} 和有源电力滤波器实际注入到三相电网中的电流 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} 之间的误差,与三角波比较产生有源电力滤波器中 IGBT 的驱动信号;

将 PI 调节后的信号和有源电力滤波器注入三相电网的电流作为预测神经网络的输入,得到预测值 $i_{n-mst}(s)$; $i_{Fh}(s-i)$ 表示 $s-i$ 时刻滤波器注入到电网中的电流, $i_{n-mst}(s)$ 表示神经网络预测得到的输出;

根据负载谐波电流 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} 与有源电力滤波器实际注入的电流 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} 之间的误差 i_{error} 、PI 调节后的信号 $u(s)$ 的变化量和神经网络预测的输出 $i_{n-mst}(s)$,利用广域预测控制准则,计算 PI 控制器参数的更新值 K_p 、 K_I ,实现 PI 控制器的在线调节;

所述静止无功补偿器控制方法包括以下步骤:

检测负载电流 I_{La} 、 I_{Lb} 、 I_{Lc} 和三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c ,计算三相电网的无功电流 I_{Lqa} 、 I_{Lqb} 、 I_{Lqc} ;

负载正常工作的额定电压设定为参考电压 U_{ref} ,参考电压 U_{ref} 与检测到的三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 之间的误差用 PI 控制器调节,经线性化环节后,产生晶闸管控制电抗器中晶闸管的控制信号;

将 PI 调节后的信号 $u(s)$ 和检测到的三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 作为预测神经网络的输入,得到预测的三相电网电压输出值;

根据 PI 调节后的信号 $u(s)$ 的变化量、参考电压 U_{ref} 和神经网络预测的输出,利用广域预测控制准则,计算 PI 控制器的更新值 K_p 、 K_I ,实现 PI 控制器的在线调节。

2. 根据权利要求 1 所述的电力电子混合系统控制方法,其特征在于,所述有源电力滤

波器为注入式有源电力滤波器。

3. 根据权利要求 1 所述的电力电子混合系统控制方法,其特征在于,所述广域预测控制准则的目标函数为:

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [y_r(s+k) - y_{n-net}(s+k)]^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \lambda_k [\Delta u(s+k-1)]^2,$$

其中, N_1 为最小预测时域长度, N_2 为最大预测时域长度, N_u 为控制时域长度, $y_r(s+k)$ 为 $(s+k)$ 时刻 I_{zk} 的期望响应, $y_{n-net}(s+k)$ 为 $(s+k)$ 时刻神经网络预测的输出, $\Delta u(\cdot)$ 为 J 的控制变量, λ_k 为权值因子。

4. 根据权利要求 1 所述的电力电子混合系统控制方法,其特征在于,所述无源电力滤波器组由若干组单调谐滤波器连接组成。

5. 根据权利要求 1 所述的电力电子混合系统控制方法,其特征在于,所述计算 PI 控制器的更新值 K_p 、 K_i 的具体步骤为:

- 1): 利用 Ziegler-Nichols 整定方法确定 PI 控制器的参数 K_p , K_i ;
- 2): 设 $s=1$, 确定神经网络的输出; 其中 s 表示当前时刻;
- 3): 计算期望值与预测值之间的误差, 如果误差为零就保持 PI 控制器 K_p , K_i 参数不变; 如果误差不为零, 进入 4); 其中期望值是计算出的需要补偿的谐波信号和无功信; 预测值是神经网络预测的输出值;
- 4): 利用 $\frac{\partial J}{\partial k(s)} = 0$, 确定 $k(s)$; 其中 $k(s) = [k_0 \ k_1]$, $k_0 = K_p + K_i$, $k_1 = -K_p$; J 为广域控制准则的目标函数;
- 5): 将 $k(s)$ 转换成 PI 控制器的参数 K_p 、 K_i ;
- 6): 令 $s=s+1$, 跳到 3)。

一种电力电子混合系统控制方法

技术领域

[0001] 本发明涉及电力电子系统，特别是一种电力电子混合系统控制方法。

背景技术

[0002] 随着电力电子技术的不断发展，电网负载呈非线性的用户以及无功负载越来越多，例如轧钢机、电弧炉、电气化铁道等。这类负载的增多使得电网中谐波成分越来越严重，造成电网元件损耗增大，影响设备正常运行，更甚者引起电网局部谐振造成严重事故；而无功负荷的增大会造成电压跌落，损耗增加等问题。因此有一个纯净、优质的电网环境与供电质量既是电网运作部门同时也是负荷用户所共同期望的。但是目前的产品大部分还存在很多不足：

1、有源电力滤波器和静止无功补偿器 SVC 都是单独使用，功能单一，不能同时实现滤波和无功补偿的双重功能。

[0003] 2、有源电力滤波器常见的控制方法有 PI 控制，滞环控制等；采用 PI 控制时控制精度较差，补偿容量低时容易振荡而且 PI 参数较难以调节；滞环控制时环宽的设定对系统影响较大，环宽小时对开关管的频率要求也高，导致应用不是十分广泛。

[0004] 3、有源电力滤波器使用 PI 控制器本身控制精度就不高，一旦发生负载突变，谐波情况发生变化时，滤波效果尤其不理想，不能实现在线控制。

[0005] 4、静止无功补偿器 SVC 使用 PI 控制器，一旦无功负载变化，补偿效果不理想，也不能实现在线控制。

[0006] 5、一般的基波谐振注入式有源电力滤波器，其基波谐振注入支路在应用于高压时，基波谐振部分要承受很高的电压，容量较大，工程应用时造价太高。

发明内容

[0007] 本发明所要解决的技术问题是，针对现有技术不足，提供一种电力电子混合系统控制方法，实现延时补偿和在线控制，提高控制精度，并改善跟踪性能，降低电网的电能损耗，净化电网污染。

[0008] 为解决上述技术问题，本发明所采用的技术方案是：一种电力电子混合系统控制方法，包括电力电子混合控制系统，电力电子混合控制系统包括有源电力滤波器、静止无功补偿器，所述静止无功补偿器包括无源电力滤波器组和晶闸管控制电抗器，有源电力滤波器、无源电力滤波器组、晶闸管控制电抗器依次并接入电网和与电网连接的负载之间，其特征在于，所述电力电子混合系统控制方法包括有源电力滤波器控制方法和静止无功补偿器控制方法：

所述有源电力滤波器控制方法包括以下步骤：

1) 检测负载电流 I_{La} 、 I_{Lb} 、 I_{Lc} ，有源电力滤波器实际注入到三相电网中的电流 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} ，计算负载谐波电流 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} ；

2) 利用 π -史密斯预测器对系统进行 $e^{\pi-\omega}$ 的延时补偿, 使得 i_{Fha}^* 、 i_{Fhb}^* 、 i_{Fhc}^* 与 i_{Lha} 、 i_{Lhb} 、 i_{Lhc} 之间相位差为 180° ;

3) 使用 PI 控制器调节负载谐波电流 i_{Lha} 、 i_{Lhb} 、 i_{Lhc} 和有源电力滤波器实际注入到三相电网中的电流 i_{Fha} 、 i_{Fhb} 、 i_{Fhc} 之间的误差, 与三角波比较产生有源电力滤波器中 IGBT 的驱动信号;

4) 将 PI 调节后的信号和有源电力滤波器注入三相电网的电流作为预测神经网络的输入, 得到预测值 $i_{n-mst}(s)$; $i_{Fh}(s-i)$ 表示 $s-i$ 时刻滤波器注入到电网中的电流, $i_{n-mst}(s)$ 表示神经网络预测得到的输出;

5) 根据负载谐波电流 i_{Lha} 、 i_{Lhb} 、 i_{Lhc} 与有源电力滤波器实际注入的电流 i_{Fha} 、 i_{Fhb} 、 i_{Fhc} 之间的误差 i_{error} 、PI 调节后的信号 $u(s)$ 的变化量和神经网络预测的输出 $i_{n-mst}(s)$, 利用广域预测控制准则, 计算 PI 控制器参数的更新值 K_p 、 K_I , 实现 PI 控制器的在线调节;

所述静止无功补偿器控制方法包括以下步骤:

1) 检测负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 和三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c , 计算三相电网的无功电流 i_{Lqa} 、 i_{Lqb} 、 i_{Lqc} ;

2) 用 PI 控制器调节负载正常工作的额定电压设定为参考电压 u_{ref} , 参考电压 u_{ref} 与检测到的三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 之间的误差用 PI 控制器调节, 经线性化环节后, 产生晶闸管控制电抗器中晶闸管的控制信号;

3) 将 PI 调节后的信号 $u(s)$ 和检测到的三相电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c 作为预测神经网络的输入, 得到预测的三相电网电压输出值;

4) 根据 PI 调节后的信号 $u(s)$ 的变化量、参考电压 u_{ref} 和神经网络预测的输出, 利用广域预测控制准则, 计算 PI 控制器的更新值 K_p 、 K_I , 实现 PI 控制器的在线调节。

[0009] 本发明的工作原理为: 所述混合电力电子混合系统由注入式有源电力滤波器, 无源电力滤波器组 PPF, 晶闸管控制电抗器 TCR 组成。无源滤波器组承担了主要的特征次谐波滤除, 注入式有源电力滤波器进行其余谐波的抑制, PPF 和 TCR 构成静止无功补偿器 SVC 进行从感性到容性的无功补偿。所述混合电力电子系统的滤波器通过 π -史密斯预测器进行延时补偿, 通过神经网络预测有源电力滤波器的输出, 广域预测控制准则计算 PI 控制器的更新值控制参数, 实现在线控制; 其静止无功补偿器通过神经网络预测电网电压, 广域预测控制准则计算 PI 控制器的更新值, 实现在线控制。

[0010] 与现有技术相比, 本发明所具有的有益效果为: 本发明的电力电子系统混合了滤波器和无功补偿器, 实现谐波抑制与无功补偿的双重功能; 该混合电力电子系统的有源电力滤波器采用 π -史密斯预测器结构进行滤波延时补偿, 滤波效果理想; 该混合电力电子

系统的有源电力滤波器采用神经网络进行预测输出,通过广域预测控制准则实现在线修改 PI 参数,控制精度大大提升,实现精确滤波;该混合电力电子系统的静止无功补偿器 SVC 采用神经网络进行预测电网电压,通过广域预测控制准则实现在线修改 PI 参数,控制精度大大提升,实现精确补偿。

附图说明

- [0011] 图 1 为本发明一实施例电力电子混合系统结构示意图;
 图 2 为本发明一实施例注入式有源滤波器系统控制原理图;
 图 3 为本发明一实施例无功补偿器系统控制原理图;
 图 4 为本发明一实施例预测神经网络训练原理图;
 图 5 为本发明一实施例预测神经网络结构图;
 图 6 为本发明一实施例 PI 参数更新流程图。

具体实施方式

[0012] 如图 1-图 3 所示,本发明电力电子混合控制系统包括有源电力滤波器、静止无功补偿器,所述静止无功补偿器包括无源电力滤波器组和晶闸管控制电抗器,有源电力滤波器、无源电力滤波器组、晶闸管控制电抗器依次并接入电网和与电网连接的负载之间,静止无功补偿器 SVC 由晶闸管控制电抗器 TCR 和无源电力滤波器 PPF 组成。无源电力滤波器 PPF 由几组单调谐滤波器组成。注入式有源电力滤波器由注入支路和有源电力滤波器组成,其中注入支路包括两组单调谐滤波器、一组高通滤波器和分压电感。这种注入支路既满足了补偿电流能够顺利注入电网,又降低了注入支路的成本。因为在 35Kv 高压下,采用基波谐振注入式时其注入支路基波容量很大,成本很高。注入式有源电力滤波器由可在线修改参数的 PI 控制器进行调节,经三角波调制后形成 IGBT 控制信号,神经网络预测有源电力滤波器的输出,通过广域预测控制准则进行 PI 参数的在线修正,实现精确控制,同时通过 π -史密斯预测进行延时补偿。静止无功补偿器 SVC 由电压闭环控制,使用 PI 控制器进行调节,神经网络预测,广域预测控制准则在线修改 PI 控制器的参数。

[0013] 电力电子混合系统控制方法,包括对有源电力滤波器的控制和对静止无功补偿器的控制:

其中对有源电力滤波器的控制,包括具体包括以下步骤:

1) 检测负载电流 I_{La} 、 I_{Lb} 、 I_{Lc} ,注入式有源电力滤波器实际注入到电网中的电流 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} ,计算负载谐波电流 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} 。

[0014] 2) 控制目标是实现 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 $I_{Fhc} = -I_{Lha}$ 、 $-I_{Lhb}$ 、 $-I_{Lhc}$,即注入式有源电力滤波器输出的补偿电流与检测得到的负载谐波电流大小相等且方向相反,而系统本身存在延时 $e^{-\omega t}$,则通过 π -史密斯预测对系统进行 $e^{\pi-\omega t}$ 的延时补偿,从而 I_{Fha} 、 I_{Fhb} 、 I_{Fhc} 与 I_{Lha} 、 I_{Lhb} 、 I_{Lhc} 之间相位差为 180° ,不必在指令电流中对检测得到的谐波进行反向,从而达到延时补偿的功能。

[0015] 3) 负载侧谐波与有源电力滤波器实际注入的电流之间的误差使用 PI 调节,与三

角波比较产生滤波器中 IGBT 的驱动信号。

[0016] 4) 神经网络进行模型辨识,其辨识过程是以神经网络输出和采样得到滤波器注入电网电流之间的误差为依据进行权值修改的训练,直至误差在设定的范围内为止完成辨识过程。神经网络的输入具有单位延时环节,PI 调节后的信号和滤波器注入电网的电流作为预测神经网络的输入,得到预测值 $\hat{i}_{n-mst}(s)$ 。

[0017] 5) 负载谐波 i_{Lh} 与滤波器实际注入的电流 i_{Fh} 之间的误差 i_{error} 、PI 调节后的信号 $u(s)$ 的变化量和神经网络预测的输出 $\hat{i}_{n-mst}(s)$ 作为广域预测控制准则的输入,计算 PI 控制器的参数的更新值 K_p 、 K_I ,实现 PI 控制器的在线调节。

[0018] 静止无功补偿器 SVC 控制方法主要步骤包括:

1) 检测负载电流 i_{La} 、 i_{Lb} 、 i_{Lc} 和电网电压 u_a 、 u_b 、 u_c ,计算电网中无功电流 i_{Lqa} 、 i_{Lqb} 、 i_{Lqc} 。

[0019] 2) 将用户负载正常工作的额定电压设定为参考电压 u_{ref} ,参考电压与检测到电网电压之间的误差使用 PI 调节,经线性化环节后,形成晶闸管的控制信号。

[0020] 3) PI 调节后的信号 $u(s)$ 和检测到的电网电压作为预测神经网络的输入,得到预测的电网电压输出值。

[0021] 4) 根据 PI 调节后的信号 $u(s)$ 的变化量、参考电压 u_{ref} 和神经网络预测的输出,利用广域预测控制准则,计算 PI 控制器的更新值 K_p 、 K_I ,实现 PI 控制器的在线调节。

[0022] 参见图 3,延时补偿功能的实现:滤波的原理就是检测负载侧中存在的谐波通过注入与它大小相等方向相反的电流使电网电流等于零的过程。 $i_{sh} = i_{Lh} + i_{Fh} \approx 0$,即 $i_{Fh} = -i_{Lh}$, i_{sh} 表示电网电流, i_{Lh} 表示负载侧谐波电流, i_{Fh} 表示有源电力滤波器注入到电网中的电流。但由于系统中是存在延时的,设其总延时环节为 e^{-ms} ,只要提前补偿一个时间环节 $e^{(r-x)s}$,则总延时就会变成 $e^{-ms} + e^{(r-x)s} = e^{-ms}$,即 $i_{Fh} = i_{Lh} * e^{-ms} = -i_{Lh}$,实现 i_{Fh} 与 i_{Lh} 之间的反向。具体实现步骤如下:

1) 先假定 $G_{inv}(s)$ 、 $G_{out}(s)$ 都是不存在延时的,以这种情形来设计控制器 $G_c(s)$ 。则 $G_c(s)$ 的闭环传递函数如下

$$G_{closed} = \frac{G_c(s) * G_{inv}(s) * G_{out}(s)}{1 + G_c(s) * G_{inv}(s) * G_{out}(s)}$$

$G_c(s)$ 表示 PI 控制器的传递函数;

$G_{inv}(s)$ 表示逆变器的传递函数;

$G_{out}(s)$ 表示电流从逆变器输出到注入电网之间的传递函数;

2) 我们的目标是设计得到控制器 G_c^* , 使 G_{closed}^* 包含了 $G_{inv}(s)$ 和 $G_{out}(s)$ 的延时环节 e^{-m} , 这样的到的闭环传递函数为

$$G_{closed}^* = G_{closed} * e^{-m}$$

$$\text{即 } \frac{G_c^*(s) G_{inv}(s) G_{out}(s) e^{-s}}{1 + G_c^*(s) G_{inv}(s) G_{out}(s) e^{-s}} = \frac{G_c(s) G_{inv}(s) G_{out}(s)}{1 + G_c(s) G_{inv}(s) G_{out}(s)} e^{-s}$$

$$\text{解得 } G_c^*(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) G_{inv}(s) G_{out}(s) (1 - e^{-s})} = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) G_p(s) (1 - e^{-s})}$$

$$\text{其中 } G_p(s) = G_{inv}(s) G_{out}(s)$$

3) 根据前面的分析可知, I_{Fh} 和 I_{Lh} 之间方向相反, 即二者之间相位差为 π , 这就意味着

$$G_p(s) e^{-m} = G_p(s) e^{-m}$$

$$G_c^*(s) = \frac{G_c(s)}{1 + G_c(s) G_p(s) (1 - e^{-s})}$$

4) 根据对模型的电路分析, 闭环系统的传递函数为

$$G_{closed} = \frac{I_{Fh}(s)}{-I_{Lh}(s)} = \frac{G_c^*(s) * G_{inv}(s) * G_{out}(s)}{1 + G_c^*(s) * G_{inv}(s) * G_{out}(s)} * e^{-s}$$

由该闭环传递函数可以看出有源电力滤波器系统消除了延时的影响, 且实现了控制目标 $I_{Fh} = -I_{Lh}$, 这一过程也是 π - 史密斯预测过程。

[0023] 有源电力滤波器和静止无功补偿器的神经网络预测模型, 广域预测控制实现在线控制的过程是相同的, 故在此集中说明。

[0024] 参见图 4, 神经网络的模型辨识过程即神经网络的训练, 直至输出误差在设定的范围之内停止。对滤波器而言是由 PI 调节后的信号 $U(s)$ 和滤波器的实际输出 $I_{Fh}(s)$ 作为输入, 对静止无功补偿器而言是由 PI 调节后的信号 $U(s)$ 和实际电网电压作为输入, 两个模型都通过预测值与实际值之间的误差作为权值修改的依据, 采用 Levenberg-Marquardt 梯度下降算法进行权值修改。不断重复这一过程, 直到误差到达设定的范围后结束训练, 成为预测模型。

[0025] 参见图 5, 神经网络的预测模型采用带有时间延迟的三层前向神经网络。其中隐含层的激活函数为双曲正切函数, 输出层的激活函数为线性激活函数。

$$y_k(s) = \sum_{j=1}^{hid} w_{jk} * f_j(net_j(s)) + b_k$$

$$net_j(s) = \sum_{i=1}^{n_u} w_{ji} * u(s-i) + \sum_{i=1}^{n_{I_{Fh}}} w_{j, n_u+i} * I_{Fh}(s-i) + b_j$$

[0026] f_j 表示隐含层的输出激活函数, w_{jk} 、 b_k 分别表示隐含层到输出层的权值和偏差, w_{ji} 、 w_{j, n_u+i} 表示输入层到隐含层的权值, b_j 表示输入层到隐含层的偏差, net_j 表示所有输

入与其对应的权值之积的总和。

[0027] 参见图 2、图 3,对 PI 的在线调节实现是通过广域预测控制准则达到的。传统的 PI 控制器其各个参数是时不变的,然而在实际工程中都是非线性系统,通常都要求 PI 参数是时变的且能够在整个控制过程中实现在线修改。为实现这一功能应用了广域控制准则 GPC criterion。其推到过程如下:

$$1) \text{ 传统的 PI 控制器可以写为: } u(s) = K_p e(s) + K_i \int_0^s e(s) ds$$

其中 K_p, K_i 分别表示比例放大倍数和积分时间常数。

[0028] 增量形式的离散 PI 控制可以表示为:

$$\text{其中 } k(s) = [k_0 \ k_1], e(s) = [e(s) \ e(s-1)], \quad k_0 = K_p + K_i, \quad k_1 = -K_p$$

2) 本控制系统所应用的广域控制准则的目标函数如下:

$$J = \sum_{k=N_1}^{N_2} [y_r(s+k) - y_{n-net}(s+k)]^2 + \sum_{k=1}^{N_u} \lambda_k [\Delta u(s+k-1)]^2$$

其中, N_1 : 最小预测时域长度

N_2 : 最大预测时域长度

N_u : 控制时域长度

$y_r(s+k)$: (s+k) 时刻的期望响应

$y_{n-net}(s+k)$: (s+k) 时刻神经网络预测的输出

$\Delta u()$: 最小化目标函数 J 的控制变量

λ_k : 权值因子

3) 由前面的分析可知 $\Delta u(s+k-1) = k(s) e^T(s)$; $k(s) = [k_0 \ k_1]$, 考虑到 $k(s)$ 为矢量, 令 $\frac{\partial J}{\partial k(s)} = 0$, 就得到 $k(s) = [e^T (a_1^T a_1 + \lambda) e]^{-1} (C a_1 e^T)$, 即得到了 K_p, K_i 的更新值。这就实现了 PI 控制器的在线控制能力。

[0029] 参见图 6, 整个计算过程可以阐述如下:

第一步: 利用 Ziegler-Nichols 整定方法确定 PI 控制器的参数 K_p, K_i 。

[0030] 第二步: 设 $s=1$, 确定神经网络的输出。 s 表示当前时刻。

[0031] 第三步: 计算期望值与预测值之间的误差, 如果误差为零就保持调节器 K_p, K_i 参数不变; 如果误差不为零, 进行第四步。期望值是计算出的需要补偿的谐波信号和无功信号。预测值是神经网络预测的输出值。

[0032] 第四步: 利用 $\frac{\partial J}{\partial k(s)} = 0$, 确定 $k(s)$ 。

[0033] 第五步: 将 $k(s)$ 转换成 PI 控制器的参数。

[0034] 第六步:令 $s=s+1$,跳到第三步。

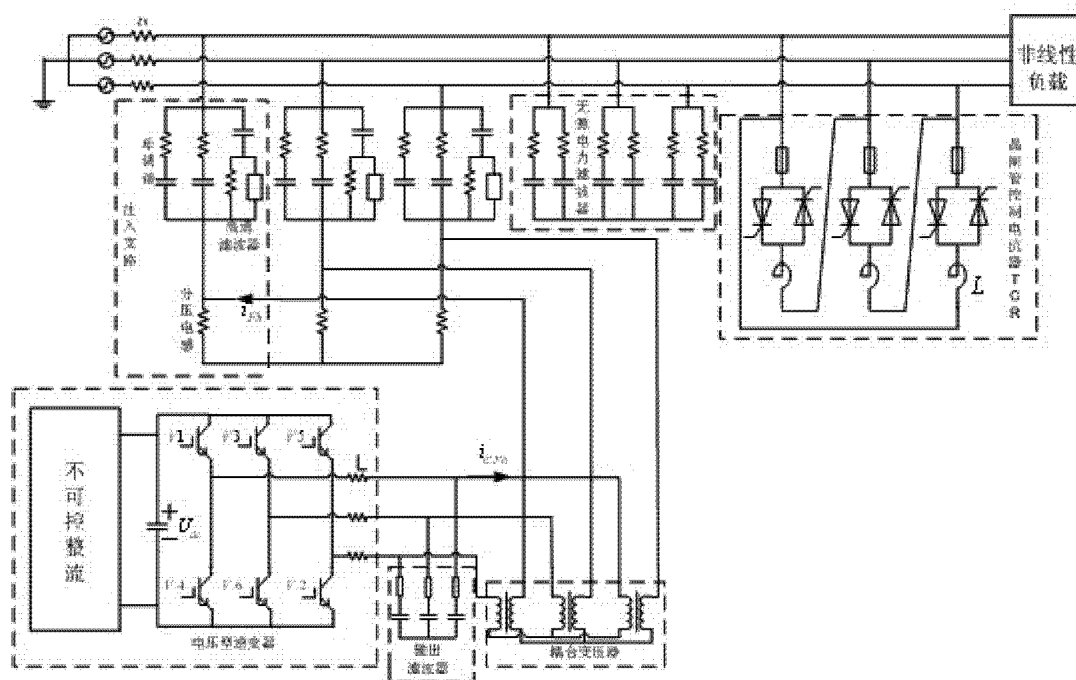


图 1

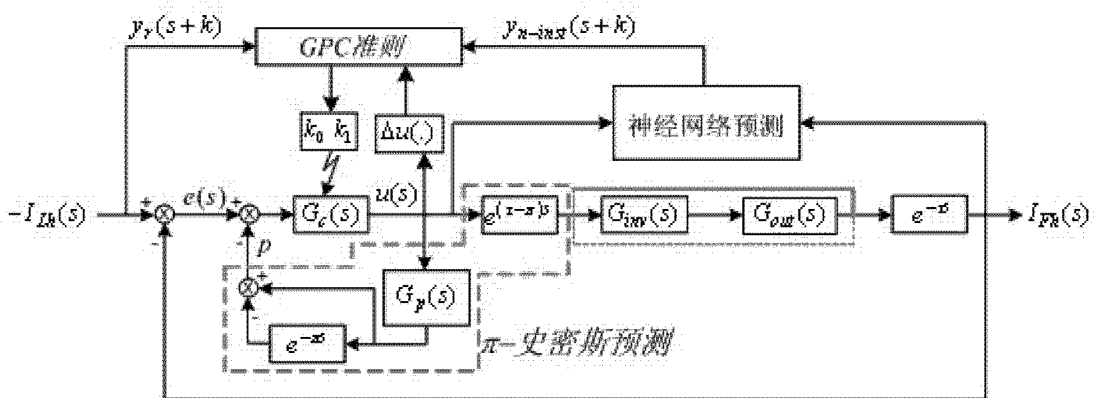


图 2

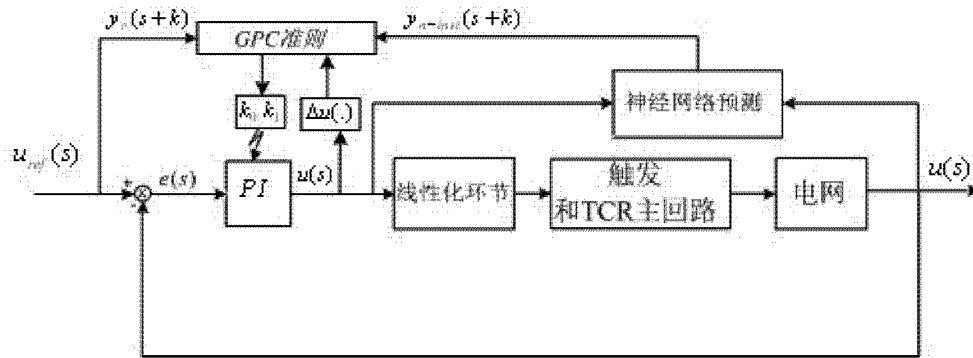


图 3

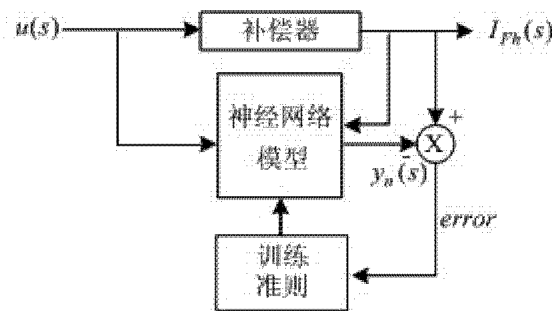


图 4

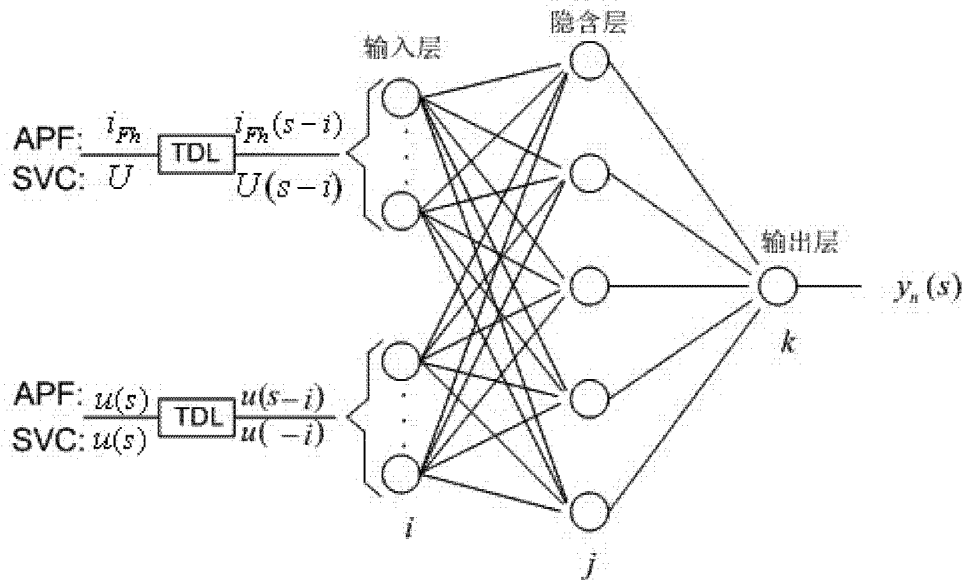


图 5

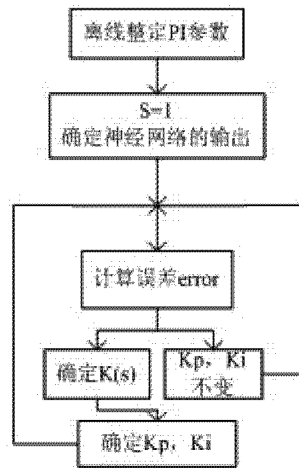


图 6