

新型混合 SVC 模型及其基于人工免疫算法的控制策略

陈赛赛,李可军,王卓迪,闫文宁

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 针对静止无功补偿器(SVC)在抑制电压闪变、滤除谐波方面效果不理想以及静止无功发生器(SVG)成本过高的问题,提出一种 FC+TCR+SVG 型混合 SVC 模型。成本低廉的大容量 SVC(FC+TCR)完成初步粗补偿,小容量 SVG 负责微补偿、抑制电压闪变以及滤除谐波,两者优势互补,最大限度地兼顾成本与性能。通过分析不同的模块布局,确定可行的电路分布结构,最大限度地减少模块间的干扰。提出基于人工免疫算法的改进型动态 PI 控制器以及模块间的协调控制策略。PSCAD 仿真结果表明,新型混合 SVC 比传统 SVC 响应速度更快,补偿效果更好,并对谐波有较好的抑制作用,其综合性能媲美 SVG,且可以节省 50% 以上的成本。

关键词: 静止无功补偿器; 模块化; 改进型 PI 控制器; 人工免疫算法; 支持向量机; PSCAD

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.04.015

0 引言

随着经济和社会的发展,负荷结构日趋复杂,用户对电能质量要求进一步提高,传统的静止无功补偿器(SVC)逐渐暴露出响应速度慢、谐波含量高缺点,严重影响其补偿效果^[1]。而性能较好的静止无功发生器(SVG),尤其是大容量 SVG,成本过高,一次性投资巨大,普通用户难以承受^[2]。因此,研究一种既有 SVC 的成本优势又有 SVG 的性能优势的混合型无功补偿装置模型适应市场需求,具有较高的经济效益和现实意义。

针对该类混合型无功补偿装置,国内学者已经做了一些初步的研究^[3-4],但仅限于电容器组与 SVG 的联合运行方面的研究,应用面过于狭窄且控制策略简单、适用性较差。

文献[3]为改善变电站动态无功补偿的效果,研究了人工投切电容器配合 STATCOM 联合运行的控制策略,并分析了其性能。然而,电能质量问题往往是瞬时性的,人工投切电容器难以做到实时调整,在实际应用中将严重制约其整体性能。

相比文献[3],文献[4]中电容器组部分采用了晶闸管投切电容器(TSC),解决了实时配合的问题,有较好的效果。但文献[4]的研究仅仅是针对异步电动机,应用面过于狭窄,并且在控制策略层面并未将其推广至负荷构成更加复杂的实际电网。此外,文献[4]未采用晶闸管控制电抗器(TCR),仅仅采用 TSC 配合 SVG,故在输出无功变化的情况下,感性输出部分完全依赖 SVG,这样会对 SVG 的容量要求更高,从而造成较高的制造成本,实际的经济效益将会受到制约。

基于智能算法的动态 PI 控制策略相关研究也较多^[5],该类研究在硬件结构上都是基于传统的 PI

控制结构,在智能算法上多采用模糊控制等早期智能算法,应用面狭窄,在内部结构相对复杂的情况下并没有就模块间的协调问题作深入研究。

鉴于此,本文提出的混合型无功补偿器采用的是 FC+TCR+SVG 的模式,即 SVC+SVG。TCR 的引入将减轻 SVG 的负担,可以进一步减小 SVG 的容量。在结构上,将小容量 SVG 以模块的形式嵌入大容量 SVC 内部,同时引入了具有良好动态性能的改进型 PI 控制器结构,并针对模型的特点,设计了基于人工免疫算法的控制策略,实时整定控制器参数,以满足系统对各部分动态性能的要求。最后,给出了各模块间的协调控制策略。基于 PSCAD 的仿真实验验证了该控制策略的有效性和模型的经济性。

1 新型 SVC 电路结构分析

SVC 模块电路由 TCR 与固定电容器组(FC)构成,其控制电路采用复合控制方法,即采用前馈与反馈相结合的控制策略^[6-8]。SVG 模块电路采用单桥路结构,其控制方法亦采用复合控制方法。

出于使用、维护、升级的灵活性以及可作为原 SVC 项目的改造手段的考虑,本模型采用模块化的设计思想,即装置内部在布局上需保持模块间相互独立。若将 SVC(FC+TCR)看作整体,结合电源侧与负载侧的相对位置,有 2 种可能的布局方式:结构 1 与结构 2。

1.1 模块布局结构 1

SVC 模块与 SVG 模块相互独立,SVC 模块靠近电源侧,SVG 模块靠近负载侧。电路结构如图 1 所示。

可见,该结构下,SVC 的控制环与 SVG 的控制环互相独立,没有形成闭环,因此两模块的控制信号之间不会相互干扰,同时,SVC 与 SVG 的控制系统

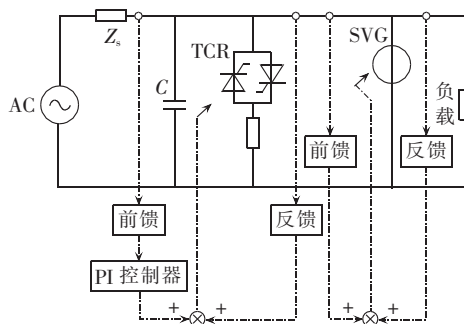


图 1 结构 1 的拓扑结构

Fig.1 Topology of Structure 1

均处于由电容 C 和系统阻抗 Z_s 构成的谐振回路之外,故控制系统可靠性较高。

但这种结构下,SVG 处于负载侧,仅能补偿负载的谐波,而 TCR 处于电源侧,工作时产生的谐波无法被 SVG 补偿,会对系统侧电网造成污染。

1.2 模块布局结构 2

SVC 模块与 SVG 模块相互独立,SVC 模块靠近负载侧,SVG 模块靠近电源侧。电路结构如图 2 所示。

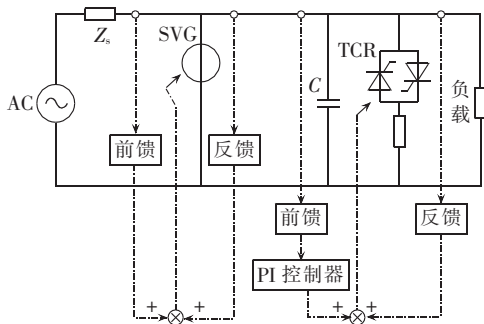


图 2 结构 2 的拓扑结构

Fig.2 Topology of Structure 2

可见,该结构下,与结构 1 一样,SVC 的控制环与 SVG 的控制环互相独立,没有形成闭环,因此两模块不会相互干扰,工作时不会产生稳定性问题,同时 TCR 处于负载侧,其产生的谐波由 SVG 补偿,不会对系统侧电网产生污染。但此时,由电容 C 和系统阻抗 Z_s 构成的谐振回路包含了 SVC 的控制系统,谐振会严重威胁 SVC 控制系统的正常运行,故该系统可靠性较差。

1.3 可行的结构

通过以上 2 种结构的分析可以发现,保持 SVC 模块与 SVG 模块相互独立无法很好地同时满足系统对性能与稳定性的要求。

针对这个实际问题,本文的解决方案是:将 SVC 模块进一步分解成 TCR 模块与 FC 模块。结合对 TCR 模块、FC 模块和 SVG 模块各部分的特点,提出一种兼顾性能与稳定性的可行的结构。

TCR 模块、FC 模块和 SVG 模块相互独立,TCR

模块靠近负载侧,FC 模块靠近电源侧,SVG 模块位于中间。电路结构如图 3 所示。

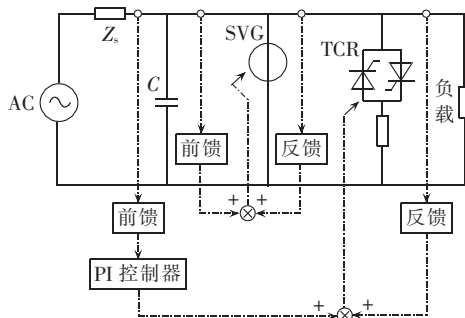


图 3 可行的拓扑结构

Fig.3 Feasible topology

将 TCR 靠近负载侧,使其产生的谐波被 SVG 补偿;FC 靠近电源侧,使电容 C 与电网阻抗 Z_s 构成的谐振回路不影响 SVC 与 SVG 的控制环,增强系统的稳定性。

但此时,SVC 的控制环与 SVG 的控制环互相形成闭环,为避免控制环之间的相互干扰,同时为了提高两模块合作的效率,必须设计相应的协调控制策略,以提高系统的可靠性。

2 基于免疫算法的改进型 PI 控制器

针对 SVC 控制系统与 SVG 控制系统中均采用的 PI 调节器,提出了基于人工免疫算法的改进型 PI 环节,通过免疫算法实时动态调整 PI 控制参数,以达到最佳的响应性能及实现模块间的协同配合。

为提高该算法的适应性以及满足客户的差异化需求,本文引入支持向量机算法,根据不同环境下对性能的不同要求,优化免疫函数,增强该算法的适应性。

2.1 采用改进型 PI 控制环节

对于传统的 PI 环节(如图 4 所示,图中标记为“+”的信号,表示直接输入系统;标记为“-”的信号,表示取其负值后输入系统,后同),当通过调整参数提高系统的响应速度时,将会引起较大的超调量;当系统超调量为零,系统响应速度则过于缓慢。响应速度与系统超调量之间的矛盾是由系统结构造成的,只能从调整系统结构的角度加以解决^[9]。

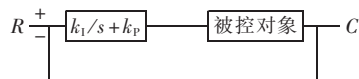


图 4 传统 PI 环节结构

Fig.4 Structure of traditional PI controller

本文将传统的 PI 环节改接成如图 5 所示的结构,对于比例环节 k_p ,只与反馈信号 C 相乘,而不是与误差信号 $R-C$ 相乘,这样,理论上可以实现无超调阶跃响应,同时,这种改进型调节器的比例增益和

积分增益的变化并不影响负荷的调整。因此,改进型 PI 环节的综合动态性能更好。

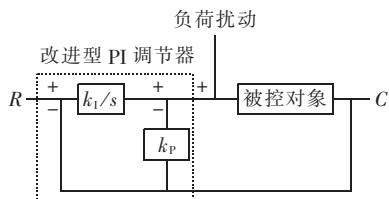


图 5 改进型 PI 环节结构

Fig.5 Structure of improved PI controller

假设被控对象为纯积分环节,其传递函数为:

$$G_0 = \frac{k}{s} \quad (1)$$

则传统 PI 环节的闭环传递函数为:

$$G_1 = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{kk_p s + kk_i}{s^2 + kk_p s + kk_i} \quad (2)$$

改进型 PI 环节的闭环传递函数为:

$$G_2 = \frac{C(s)}{R(s)} = \frac{kk_i}{s^2 + kk_p s + kk_i} \quad (3)$$

其阶跃响应对比曲线见图 6(取 $k = k_i = k_p = 1$)。

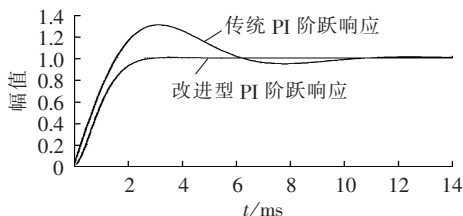


图 6 传统 PI 环节与改进型 PI 环节的阶跃响应对比曲线

Fig.6 Comparison of step response curve between traditional and improved PI controller

可见,从超调量来看,相比传统 PI 环节的约 30% 的超调量,改进型 PI 环节的超调量非常小,几乎为零;从响应速度来看,改进型 PI 环节仅用了 3 ms 稳定于设定值,而传统型需要大约 12 ms,改进型的响应速度是传统型的 4 倍。因此,改进型 PI 环节无论是响应速度还是超调量,均优于传统型 PI 环节,对于需要兼顾响应速度与超调量的新型 SVC 系统,这种改进型 PI 调节器是合适的选择。

2.2 PI 参数的在线动态优化

传统 PI 控制器参数 k_p, k_i 在整个调节过程中始终保持不变,由于 PI 控制本质上是一种线性控制,其参数的整定值是局部最优值,而非全局最优值。这极大地限制了 PI 控制器性能的发挥,很难满足特殊情况下对系统响应速度的要求^[10]。

针对这一问题,本文将改进型 PI 调节器和人工免疫算法相结合,利用免疫控制策略,根据不同的偏差、偏差变化率对 PI 控制器的参数 k_p, k_i 进行实时调整,用实时动态优化的 PI 参数去适应 SVC 控制的全过程,以提高其动态性能。在系统响应的初期,可以通过增大 k_p 且减小 k_i 来提高其响应速度;在系统

响应的末期,系统目标值比较接近设定值时,可以通过减小 k_p 且增大 k_i 来减小其超调量。动态 PI 控制器兼顾了响应速度与超调量,使其响应性能获得全局最优。

2.3 免疫算法与控制器建模

免疫是生物体的一种生理反应,是一个极其复杂的自适应系统。人体免疫原理如图 7 所示^[11-12],其中实线代表正向作用(在该作用下数量增加),虚线代表反向作用(在该作用下数量降低)。

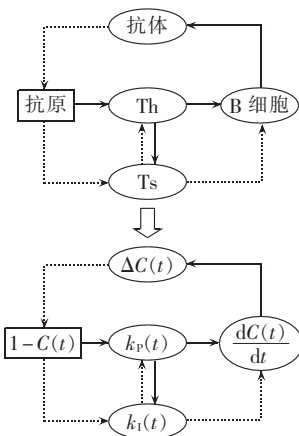


图 7 人工免疫算法简化原理图

Fig.7 Simplified schematic diagram of artificial immune algorithm

类比 PI 控制系统与生物的免疫响应过程,系统输出瞬时值与设定值之间的差值相当于抗原,比例系数 k_p 相当于辅助细胞 Th 的数量,积分常数 k_i 相当于抑制细胞 Ts 的数量。在系统控制的初期,抗原数量较大(输出瞬时值较小,系统输出瞬时值与设定值之间的差值较大),刺激产生较多的辅助细胞 Th(增大 k_p , 提高响应速度)和较少的抑制细胞 Ts(减小 k_i),在系统控制的末期,抗原数量较小(输出瞬时值比较接近设定值),刺激产生较多的抑制细胞 Ts(增大 k_i , 提高系统稳态精度,降低超调量)减少辅助细胞 Th(减小 k_p)。

假设 t 时刻系统的控制瞬时输出值为 $C(t)$,动态 PI 参数瞬时值为 $k_p(t), k_i(t)$,则在 $t+\Delta t$ 时刻有:

$$\begin{cases} k_p(t+\Delta t) = k_p(t) + f_{Th}(k_i(t), 1-C(t)) \\ k_i(t+\Delta t) = k_i(t) + f_{Ts}(k_p(t), 1-C(t)) \\ \frac{dC(t)}{dt} = f_B(k_p(t), k_i(t)) \\ C(t+\Delta t) = C(t) + \Delta C(t) \\ \Delta C(t) = dC(t) \end{cases} \quad (4)$$

其中, $f_{Th}(\cdot)$ 为辅助细胞函数,其选取反映了系统对响应速度的要求; $f_{Ts}(\cdot)$ 为抑制细胞函数,其选取反映了系统对稳态精度与超调量的要求; $f_B(\cdot)$ 为 B 细胞函数,其选取反映了系统对整体性能的调节能力。

由式(4)可求得每个时刻动态 PI 参数瞬时值

$k_p(t)$ 、 $k_i(t)$ ，从而实现对 PI 控制器的全局动态优化，其流程图如图 8 所示。

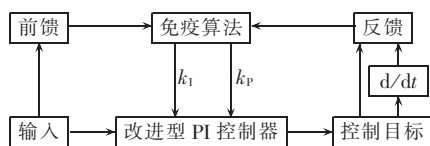


图 8 基于免疫算法的改进型 PI 控制流程
Fig.8 Flowchart of improved PI control based on immune algorithm

2.4 支持向量机优化免疫函数

为了不失一般性，将不同的函数($f_{th}(\cdot)$ 、 $f_{ts}(\cdot)$ 、 $f_B(\cdot)$)统称为免疫函数 $f(x)$ ，根据不同要求(如响应速度、稳态精度、超调量和整体性能等)，产生支持向量机优化算法所需的函数预期响应的样本集 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_l, y_l)\}$ ，将系统的 PI 控制器参数 k_p, k_i 以及 $1-C(t)$ 共 3 个特征量作为支持向量机模型的输入量 $x_i=[k_p, k_i, 1-C(t)]$ ，免疫函数对应的取值 $f(x_i)$ 作为模型的输出量， y_i 为样本集内预期输出的实际值， l 为样本数。样本 x 通过非线性空间映射到高维空间，同时，依据结构风险最小定理^[13-14]，构造回归函数：

$$f(x)=\omega\phi(x)+b \tag{5}$$

通过支持向量机训练可求得免疫函数 $f(x)$ 的支持向量机拟合函数为(结构如图 9 所示)：

$$f(x)=\sum_{i=1}^l(\alpha_i-\alpha_i^*)K(x_i,x)+b \tag{6}$$

其中， α_i, α_i^* 为引入的非负的 Lagrange 乘子； $K(x_i, x)$ 为核函数，核函数采用径向基核函数^[15-16]，如式(7)所示。

$$K(x,y)=\exp(-\|x-y\|_2^2/\sigma^2) \tag{7}$$

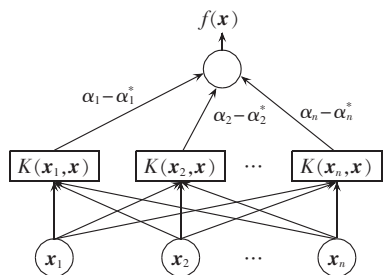


图 9 支持向量机优化结构图
Fig.9 Optimal structure of support vector machine

3 基于免疫 PI 控制器的 SVC 模块与 SVG 模块协调控制

SVC 模块与 SVG 模块的控制器之间差异较大，主要是其动态性能指标不同^[17]。SVG 响应迅速，其开环响应时间常数为 1/4 个周期，而 SVC 为 2 个周期，故两者控制器之间易发生相互干扰，影响整体性能的发挥。

此外，两模块间动作的先后顺序也较为关键。当无功缺额较大时，由于 SVG 响应时间常数非常小，其会率先动作，立刻进入极限的输出状态并保持极限运行，导致其没有充足的无功储备，严重影响后期滤波效果。

为了解决上述问题，本文提出了如图 10 所示的模块间协调控制方案，并且引入了基于人工免疫算法的改进型动态 PI 控制器，以保证系统跟踪电压波动、抑制闪变和滤波的性能要求，从而提高各模块的响应速度以及模块间的协调能力。

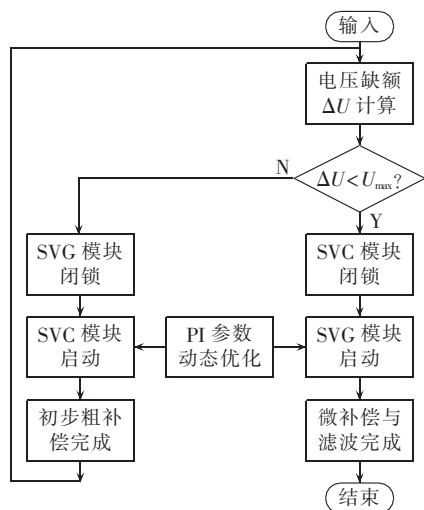


图 10 模块间协调控制流程图
Fig.10 Flowchart of coordinative control among modules

3.1 SVG 模块控制策略

当电压缺额较大，超出 SVG 模块最大补偿能力时，SVG 模块立即进入闭锁状态，防止其率先动作，不仅无法完成补偿要求，还会影响 SVC 模块的工作。待 SVC 模块完成初步粗补偿以后，再开始运行，完成最后的微补偿与消除谐波。

当电压缺额较小时，闭锁 SVC 模块，由 SVG 模块单模块运行，完成无功补偿与消除谐波。

3.2 SVC 模块控制策略

当电压缺额较大，超出 SVG 模块最大补偿能力时，SVC 模块立即动作，同时，改进型免疫 PI 控制器动态调整 SVC 模块的 PI 控制器参数，使其以最快的响应速度完成粗补偿，并向协调控制器发出粗补偿已完成的信号。

当电压缺额较小时，SVC 模块立即闭锁，由 SVG 模块单模块运行，完成无功补偿与消除谐波。

4 仿真实验

为验证本文所提出的新型 SVC 控制策略的有效性和经济性，搭建了基于 PSCAD 的仿真系统，分别对传统的 SVC 和本文所提出的新型混合 SVC 进

行仿真对比。同时,通过对比不同容量 SVG 接入后的补偿效果,确定合适的 SVG 与 SVC 模块容量比。该系统主电路如图 11 所示。

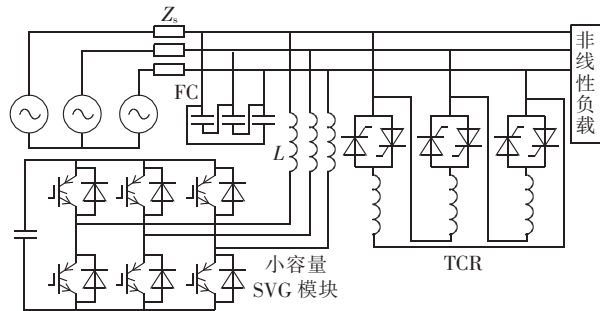


图 11 仿真系统结构图
Fig.11 Structure of simulation system

系统仿真参数如下:系统电压 380 V,频率 50 Hz; SVG 模块与 SVC 模块容量比为 1:4; SVG 模块 PI 控制器初始参数 $k_p=3$ 、 $k_i=90$; SVC 模块 PI 控制器初始参数 $k_p=0.5$ 、 $k_i=60$ 。

为了验证新型混合 SVC 的性能,通过大电感的投切来模拟负载侧电压的跌落现象。

4.1 动态性能对比

在 $t=1.5\text{ s}$ 时,负载侧突然投入大电感,在 0.75 s 后再切除。

4.1.1 电压响应对比

传统 SVC 响应曲线与新型 SVC 的响应曲线对比图如图 12 所示(图中电压响应为标么值)。

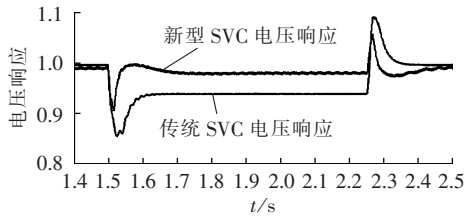


图 12 电压响应仿真对比图
Fig.12 Comparison of voltage response

从图中可以看出,新型 SVC 经过 3 ms 后电压稳定于 0.98 p.u.,而传统 SVC 经过 13 ms 后稳定于 0.93 p.u.。可见,新型 SVC 调节时间更短且补偿效果更好。

4.1.2 功率因数对比

新型 SVC 与传统 SVC 的功率因数的变化如图 13 所示。

从图中可以看出,当大电感投入时,负载侧功率因数迅速下降,相比传统 SVC(功率因数跌至 0.85 以下时才开始动作,最后稳定于 0.92),新型 SVC 的响应速度更快,在功率因数跌至 0.9 时迅速动作,并很快完成补偿,稳定于 0.98 左右。由此可见新型 SVC 在功率因数补偿方面,响应速度更快,补偿效果更好。

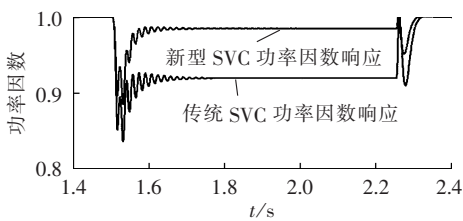


图 13 功率因数仿真对比图
Fig.13 Comparison of simulative power factor

4.2 谐波含量对比

根据仿真结果(以 A 相为例)分析计算了在平衡负载与不平衡负载下的负载侧谐波含量,如表 1、2 所示。

表 1 传统 SVC 的谐波含量				
Table 1 Harmonic contents of traditional SVC				
负载	谐波含量/%			
	3 次	5 次	7 次	
平衡负载	1.21	2.85	0.88	
不平衡负载	8.21	3.85	0.98	

表 2 新型 SVC 的谐波含量				
Table 2 Harmonic contents of novel SVC				
负载	谐波含量/%			
	3 次	5 次	7 次	
平衡负载	0.85	0.54	0.48	
不平衡负载	1.51	0.52	0.13	

4.2.1 平衡负载

在平衡负载下(如图 14 所示),负载处 5 次谐波为主要谐波,含量较大(高达 2.85%)。新型 SVC 补偿后,其 5 次谐波含量下降至 0.54%,其他各次谐波也有不同程度的抑制,滤波效果明显。

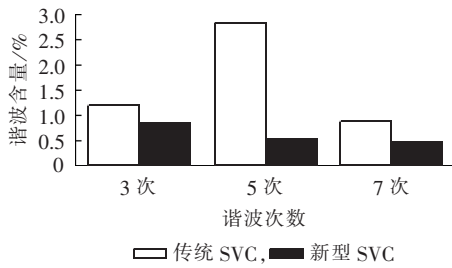


图 14 平衡负载下谐波含量对比图
Fig.14 Comparison of harmonic contents for balanced load

4.2.2 不平衡负载

在不平衡负载下(如图 15 所示),原负载处 3 次谐波为主要谐波,含量较大(高达 8.21%)。新型 SVC 补偿后,其 3 次谐波含量下降至 1.51%,滤波效果明显。同时,其他各次谐波也有不同程度的抑制。可见,新型 SVC 对谐波有较好的抑制作用。

4.3 SVG 配置容量优化与成本分析

一般而言,当容量较小时,同容量 SVG 的成本是 SVC 的 2~3 倍;当容量较大时,同容量 SVG 的成

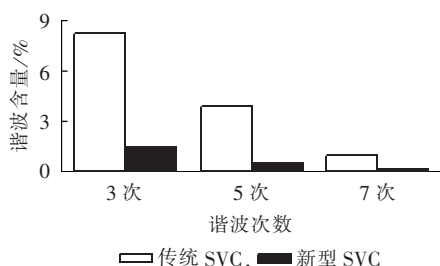


图 15 不平衡负载下谐波含量对比图

Fig.15 Comparison of harmonic contents for unbalanced load

本是 SVC 的 5 倍左右。无论对用户还是厂家,成本都是他们最关心的问题之一,本文有必要就性能与成本的关系以及 SVG 配置容量的优化问题进行仿真,以得出可靠的结论。

基于上述仿真模型,分别设置 SVG 模块的相对容量(SVG 容量占 SVC 容量的百分比)为 0%、5%、10%、15%、20%、25%、30%、35%,统计其响应速度与各次谐波含量分别如图 16、图 17 所示。

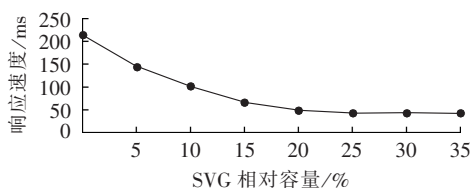


图 16 系统响应速度随 SVG 相对容量变化曲线

Fig.16 Curve of system response vs. SVG relative capacity

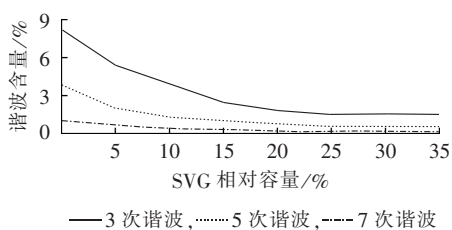


图 17 各次谐波含量随 SVG 相对容量变化曲线

Fig.17 Curve of harmonic content vs. SVG relative capacity for different orders

在初期,相对容量较小,随着 SVG 相对容量的增加,系统响应速度和谐波含量等性能的改善明显;在后期,尤其是相对容量大于 25% 以后,响应速度和谐波含量曲线趋于“饱和”,性能趋于稳定,但此时,成本却随着 SVG 相对容量的增大而继续增加。可见,混合型无功补偿器 SVG 模块相对容量的选取十分关键。

在本仿真算例中,25% 是一个相对比较合适、性价比比较高的 SVG 相对容量取值。若取同容量 SVG 价格为 SVC 的 3 倍,则 SVG 相对容量为 25% 的混合型无功补偿器的成本相比同容量 SVG 节省了 53.3%,可见,SVG 相对容量为 25% 的混合型无功补偿器既

保证了性能的要求,又最大限度地控制了成本。

5 结论

本文结合 SVC 与 SVG 在成本和性能方面的特点,提出了一种性价比很高的混合型无功补偿器,并对其内部电路布局合理性以及在运行过程中不同模块控制系统间的协调问题进行分析,提出了基于人工免疫算法的改进型 PI 控制策略,显著改善了系统的性能。

仿真结果表明,新型混合 SVC 相比传统 SVC 响应速度更快、补偿效果更好,且对谐波有较好的抑制作用,性能媲美 SVG。同时,混合型无功补偿器 SVG 模块相对容量的选取十分关键。配置合适相对容量的新型混合 SVC(本算例为 25%)在不损失性能的前提下,具有显著的经济效益(本算例节省成本 53.3%)。

综上所述,本文研究的新型混合 SVC 模型及其控制策略,在达到同容量 SVG 相同性能要求的前提下可节省约 50% 以上的投资,是对国内现有 SVC 装置进行改造的可行方案之一。

参考文献:

- [1] 蒋玮,陈武,胡仁杰. 基于超级电容器储能的微网统一电能质量调节器[J]. 电力自动化设备,2014,34(1):85-90.
JIANG Wei, CHEN Wu, HU Renjie. United power quality conditioner based on supercapacitor for microgrid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 85-90.
- [2] 何圣仲,许建平,周国华,等. 谷值 V^2 控制 Boost 变换器原理及稳定性分析[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):65-70.
HE Shengzhong, XU Jianping, ZHOU Guohua, et al. Principle and stability analysis of valley V^2 controlled Boost converter [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(7): 65-70.
- [3] 朱永强,崔文进,胡东辰,等. 50 Mvar 静止补偿器接入系统运行策略仿真研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(21):77-80.
ZHU Yongqiang, CUI Wenjin, HU Dongchen, et al. Simulation study on the running strategy of the 50 Mvar STATCOM [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(21): 77-80.
- [4] 胡国文,於锋,王威. STATCOM 与固定电容组合的高压异步电动机动态无功补偿节能技术[J]. 电力自动化设备,2011,31(3):75-78.
HU Guowen, YU Feng, WANG Wei. Energy-saving technology of dynamic reactive power compensation based on STATCOM and fixed capacitor for HV induction motor [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 75-78.
- [5] 李琼林,刘会金,孙建军,等. 基于模糊逻辑的参数自整定 PI 控制在有源滤波器中的应用[J]. 电力自动化设备,2005,25(10):17-21.
LI Qionglin, LIU Huijin, SUN Jianjun, et al. Fuzzy-PI control used in APF [J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(10): 17-21.
- [6] 付俊,赵军,乔治·迪米罗夫斯基. 静态无功补偿器鲁棒控制的一种新自适应逆推方法[J]. 中国电机工程学报,2006,26(10):7-12.
FU Jun, ZHAO Jun, DIMIROVSK G M. Robust control of SVC: a new adaptive back stepping method [J]. Proceedings of the

- CSEE,2006,26(10):7-12.
- [7] 丁青青,王赞基. TCR-TSC 型 SVC 的非仿射非线性控制器设计[J]. 电力系统自动化,2002,26(14):12-19.
DING Qingqing,WANG Zanji. A new design of TCR-TSC SVC controller based on non-affined nonlinear model[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(14):12-19.
- [8] 牛伟,房大中. 基于 GATS 混合算法的 PSS 与 SVC 控制器参数设计[J]. 电力系统及其自动化学报,2006,18(1):43-48.
NIU Wei,FANG Dazhong. Coordination design of PSS and SVC damping controller using GATS hybrid algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2006,18(1):43-48.
- [9] 杨火荣. 快速响应和无超调的改进型 PI 调节器[J]. 工业仪表与自动化装置,1979,2(1):50-53.
YANG Huorong. Improved quick response PI without overshoot [J]. Industrial Instrumentation & Automation,1979,2(1):50-53.
- [10] 曾果,李兴源,段毅. 基于内模控制理论的 HVDC IMC-PID 控制器设计[J]. 电力自动化设备,2014,34(4):162-167.
ZENG Guo,LI Xingyuan,DUAN Yi. Design of IMC-PID controller based on internal model control theory for HVDC control system [J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(4):162-167.
- [11] HUNT J E,COOKE D E. An adaptive,distributed learning system based on the immune system[C]//1995 IEEE International Conference on Systems,Man and Cybernetics. Vancouver, Canada:[s.n.],1995:2494-2499.
- [12] DING Y,REN L. Fuzzy self-tuning immune feedback controller for tissue hyperthermia[C]//The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems. San Antonio,USA:[s.n.],2000:534-538.
- [13] 张学工. 关于统计学习理论与支持向量机[J]. 自动化学报,2000,26(1):32-42.
ZHANG Xuegong. Introduction to statistical learning theory and support vector machines[J]. Acta Automatica Sinica,2000,26(1):32-42.
- [14] KEERTHI S S,LIN C J. Asymptotic behaviors of support vector machines with Gaussian kernel[J]. Neural Computation,2003,15(7):1667-1689.
- [15] 徐咏梅,柳桂国,柳贺. 高斯径向基核函数参数的 GA 优化方法[J]. 电力自动化设备,2008,28(6):52-55.
XU Yongmei,LIU Guiguo,LIU He. GA based parameter optimization of Gauss kernel function [J]. Electric Power Automation Equipment,2008,28(6):52-55.
- [16] 何旭,姜宪国,张沛超,等. 基于 SVM 的小样本条件下继电保护可靠性参数估计[J]. 电网技术,2015,39(5):1432-1437.
HE Xu,JIANG Xianguo,ZHANG Peichao,et al. SVM based parameter estimation of relay protection reliability with small samples[J]. Power System Technology,2015,39(5):1432-1437.
- [17] 杨振宇,许胜,许杏桃. 高压大容量 D-STATCOM 主电路的比较与分析[J]. 电力自动化设备,2011,31(6):50-55.
YANG Zhenyu,XU Sheng,XU Xingtao. Comparison and analysis of high-voltage large-capacity D-STATCOM main circuit [J]. Electric Power Automation Equipment,2011,31(6):50-55.

作者简介:



陈赛赛

陈赛赛(1990—),男,江苏南通人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统动态增容与在线监测(E-mail:061332.sai@163.com);

李可军(1972—),男,山东高密人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为柔性交、直流输配电技术,输变电设备状态检修(E-mail:lkjun@sdu.edu.cn);

王卓迪(1986—),男,山东潍坊人,博士研究生,主要研究方向为多端直流输电、HVDC 系统控制策略;

闫文宁(1990—),男,山东肥城人,硕士研究生,主要研究方向为基于电压源换流器的多端直流输电技术。

Advanced hybrid SVC model and corresponding control strategy based on artificial immune algorithm

CHEN Saisai,LI Kejun,WANG Zhuodi,YAN Wenning

(School of Electrical Engineering,Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Since the effect of SVC(Static Var Compensator) is not ideal in voltage flicker suppression and harmonic elimination and SVG(Static Var Generator) is too expensive,a hybrid SVC model of FC+TCR+SVG is proposed. The cheap and large-capacity SVC(FC+TCR) compensates most reactive power while the small-capacity SVG compensates remaining reactive power,suppresses voltage flicker and eliminates harmonics, which complement each other to give utmost consideration to both cost and performance. Different module structures are analyzed to determine a feasible structure of circuit distribution for minimizing the interference among modules. An improved dynamic PI controller based on the artificial immune algorithm and a strategy of coordinative control among modules are proposed. The results of PSCAD simulation show that,compared with the traditional SVC,the proposed hybrid SVC has faster response speed and better performance in compensation and harmonic suppression. It is comparable with SVG in comprehensive performance and saves more than 50% cost.

Key words: static var compensator; modularization; improved PI controller; artificial immune algorithm; support vector machines; PSCAD