

· 专论与综述 ·

## 基于根轨迹法的链式 STATCOM 比例谐振电流控制器设计

黄 华<sup>1</sup>, 周波达<sup>2</sup>, 费建平<sup>2</sup>, 陈赤汉<sup>1</sup>, 刘 磊<sup>1</sup>

(1.南京南瑞继保电气有限公司,江苏南京 211102;2.浙江电力公司舟山供电公司,浙江舟山 316021)

**摘要:**链式静止同步补偿器(STATCOM)及其分相电流控制策略是解决系统和负载不平衡问题的常用方法。文中在分析链式 STATCOM 数学模型的基础上,提出采用比例谐振控制器来对分相电流进行跟踪控制,并给出应用闭环系统根轨迹来选择控制器参数的设计方法,该设计方法可以使得电流内环闭环系统不仅满足稳定性要求,同时具有良好的动态性能。最后通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了基于根轨迹法比例谐振控制器参数设计的正确性和电流内环采用 PR 控制的优越性。

**关键词:**STATCOM;比例谐振积分;分相控制;根轨迹法

**中图分类号:**TM46

**文献标志码:**A

**文章编号:**1009-0665(2015)02-0001-04

基于 H 桥级联的静止无功发生器(STATCOM)因其易于模块化、效率高、谐波含量少、高可靠性、可分相控制等优点,已成为现阶段高压大功率 STATCOM 的主流拓扑<sup>[1-3]</sup>。目前,针对链式 STATCOM 的电流控制策略已有许多研究成果。文献[3]针对采用双环控制结构的 STATCOM 电流内环的比例积分(PI)控制参数整定困难的问题,提出采用线性化状态反馈解耦的电流控制策略,虽然动态响应优良,但电流控制器对模型参数的依赖性较强,一旦实际参数受环境影响发生偏差,必然会使输出出现误差;文献[4]建立了旋转坐标下 STATCOM 小信号模型,电流内环采用纯比例调节器,在稳态工作点附近具有较好的稳定性和跟踪精度,但存在由比例系数对模型参数依赖性大和对大扰动信号跟踪时误差较大的问题;文献[5]在三相静止坐标系下的 STATCOM 小信号模型基础上,分别进行了比例和比例积分的电流调节器设计及比较,由于输入信号是交流量,无论采用比例还是比例积分控制,均存在稳态误差,同样存在小信号模型不适用于大扰动工况;国内首套±100 Mvar 链式 STATCOM 的采用比例积分控制对交变的参考电流进行分相跟踪控制,受制于 PI 调节只能对直流量进行无偏差控制,实际电流跟踪时会存在跟踪偏差<sup>[6]</sup>。

比例谐振(PR)控制器能够在静止坐标系下对工频电流进行无静差调节,无须  $dq$  旋转坐标变换,无须正负序分解,虽有学者对其在链式 STATCOM、并网逆变器、模块化多电平高压直流输电等领域的应用进行前期研究<sup>[7-9]</sup>,但均未对比例谐振控制器参数设计进行深入研究。文献[10]在 PWM 整流器控制中对电流内环采用比例谐振控制,给出的基于根轨迹法的控制器参数设计方法只能获得比例系数取值的合适区间,而未给出谐振系数的选择依据。本文采用准比例谐振控

制器,通过引入截止频率  $\omega_c$  来降低文献[10]中的比例谐振控制器对电网和负荷波动的敏感度;另外,本文以比例系数  $k_p$  为根轨迹增益,通过根轨迹分析,得到控制器时间常数  $T_i$  的最佳取值区间,即给出了谐振系数的选择依据。

## 1 STATCOM 数学模型及控制

链式 STATCOM 的拓扑如图 1 所示。其中  $u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}$  为 STATCOM 接入点相电压,相应  $u_{sab}, u_{sbc}, u_{sca}$  为接入点线电压,  $i_{ab}, i_{bc}, i_{ca}$  为 STATCOM 角内电流,  $u_{rab}, u_{rbc}, u_{rca}$  为 STATCOM 输出电压,  $u_{dxi}(x=a, b, c; i=1, 2, \dots, n)$  为各独立直流电容电压,  $L_1, L_2$  为串接在阀组两端的连接电感。

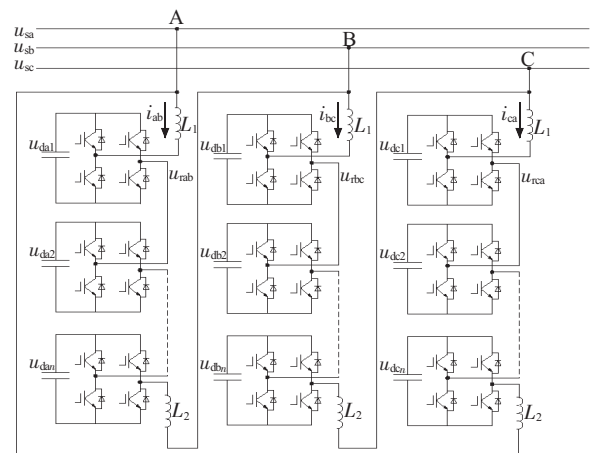


图 1 链式 STATCOM 拓扑图

根据基尔霍夫电压定律,STATCOM 的数学模型则是:

$$\begin{cases} u_{rab} = u_{sab} - (L_1 + L_2) \frac{di_{ab}}{dt} \\ u_{rbc} = u_{sbc} - (L_1 + L_2) \frac{di_{bc}}{dt} \\ u_{rca} = u_{sca} - (L_1 + L_2) \frac{di_{ca}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

收稿日期:2014-10-22;修回日期:2014-11-30

基金项目:国家电网公司重大科技示范项目(52110113090U)

由于链式 STATCOM 三角形接线,三相电流相互独立,因此可以分别对三相电流进行独立控制。采用电压外环和电流内环的双环的 STATCOM 控制框图如图 2 所示。以 AB 相为例, $u_{d\_ab}^*$  为直流电容电压参考值, $u_{d\_ab}$  为 AB 相阀组所有直流电容电压的平均值, $u_{d\_ab}^*$  和  $u_{d\_ab}$  的差值经 PI 调节后得到有功电流幅值  $I_{dab}^*$ ;  $I_{qab}^*$  为通过上级参考电流计算得到的需要补偿的无功电流幅值,  $I_{dab}^*$  和  $I_{qab}^*$  分别乘以 AB 相电压相角  $\varphi_{ab}$  的余弦与正弦,然后相加,则得到 AB 相的参考电流  $i_{ab}^*$ ,将  $i_{ab}^*$  和 AB 相实测电流  $i_{ab}$  做差后进行 PR 调节,将前馈线电压  $u_{sab}$  减去 PR 调节器输出,得到最终的调制电压  $u_{rab}$ ,最后经过载波移相 SPWM 得到 STATCOM 的驱动脉冲。

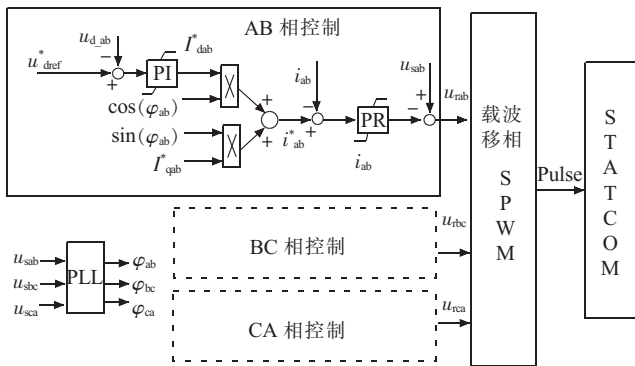


图 2 链式 STATCOM 控制框图

## 2 电流内环控制器设计

传统的比例谐振控制器传递函数式<sup>[7-10]</sup>为:

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{k_r s}{s + \omega_0} \quad (2)$$

式(2)中: $k_p$  为积分系数; $k_r$  为谐振系数; $\omega_0$  为谐振频率。

在输入信号频率为  $\omega_0$  时,控制器的传递函数具有无穷大的增益,从而使得输出稳态误差为 0,从而实现交流信号的无静差跟踪。但由于控制器传递函数在谐振频率  $\omega_0$  处存在过于狭窄的频段和过高的增益,使得控制器对电网和负载的波动特别敏感,因此本文使用一种准比例谐振控制器来避免上述问题,即:

$$G_{PR}(s) = k_p + \frac{k_r \omega_c s}{s + \omega_c s + \omega_0} \quad (3)$$

通过引入  $\omega_c$  来降低比例谐振控制器对电网和负荷波动的敏感度, $\omega_c$  为截止频率,一般取 5~15 rad/s。

以  $k_p=3, k_r=20, \omega_c=10$  rad/s, 谐振频率取电网频率,利用 MATLAB 计算工具对式(2)和式(3)2 种比例谐振控制器做波特图比较,结果如图 3 所示。虽然准比例谐振控制器在谐振频率处的增益有所降低,但谐振频率附近的带宽明显增加了,因此准比例谐振控制器

必然可以减小电网和负荷参数变化的敏感性,有助于提高整个闭环控制系统的稳定性。

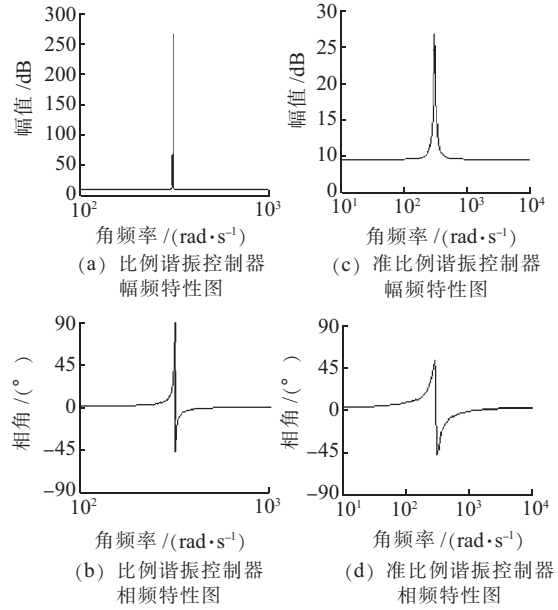


图 3 2 种比例谐振控制器 Bode 图

根据式(1)的 STATCOM 数学模型和图 1 所示的控制框图,得出基于比例谐振的电流内环简化控制框图,如图 4 所示。考虑到载波移相 SPWM 的计算和执行的滞后性,将 STATCOM 等效成时间常数为  $1.5T_s$  的一阶惯性环节,其中  $T_s$  为 STATCOM 等效开关周期, $L$  为连接电感, $r$  为连接电感的内阻。

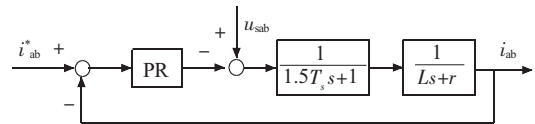


图 4 STATCOM 电流内环控制框图

根据图 4 得出电流内环开环传递函数:

$$G_{op}(s) = (k_p + k_r \frac{\omega_c s}{s + \omega_c s + \omega_0}) \times \frac{1}{1.5T_s s + 1} \times \frac{1}{Ls + r} \quad (4)$$

相应的电流内环闭环传递函数为:

$$G_{cl}(s) = \frac{k_p (s^2 + \omega_c s + \omega_0) + k_r \omega_c s}{(s + \omega_c s + \omega_0) [(1.5T_s s + 1)(Ls + r) + k_p] + k_r \omega_c s} \quad (5)$$

电流内环闭环传递函数是 4 阶高阶系统,工程上通常用主导极点的概念对高阶系统进行近似分析,同时为了使得闭环系统获得良好的动态性能,主导极点的阻尼比需要大于 0.707。根轨迹是指开环系统某一参数(主要是根轨迹增益)从零变化到无穷时,闭环系统特征方程式的根在  $s$  平面上变化的轨迹,根轨迹图不仅可以直接给出闭环系统时间响应的全部信息,而且可以指明开环零、极点应该怎样变化才能满足给定的闭环系统的性能指标要求<sup>[11]</sup>。本文分别以  $k_p$  和  $k_r$  为根轨迹增益进行闭环系统根轨迹分析,得到  $k_p$  和  $k_r$  合适取值范围,使得闭环系统不仅满足稳定性要求,而且

具有良好的动静态性能。链式 STATCOM 参数如表 1 所示。以表 1 中的参数为例,详述电流内环控制器参数的根轨迹分析设计方法。

表 1 链式 STATCOM 主要参数

参数名称	参数大小
STATCOM 容量 /Mvar	100
接入点电压 /kV	35
电网频率 /Hz	50
连接电抗 /mH	14
电抗内阻 /Ω	0.22
等效开关频率 /kHz	3.6

### 2.1 以 $k_p$ 为根轨迹增益

令  $T_i = k_p / k_r$ ,  $T_i$  即固定谐振积分器的时间常数,假设  $T_i$  为已知,则  $k_p$  即为开环根轨迹增益,此时开环传递函数为:

$$G_{op}(s) = k_p \left( 1 + k_r \frac{\omega_c s}{T_i(s^2 + \omega_c s + \omega_0^2)} \right) \times \frac{1}{1.5T_i s + 1} \times \frac{1}{Ls + r} \quad (6)$$

由于采用标么化控制系统,因此式(6)中的  $L$  和  $r$  需要除以 STATCOM 等效阻抗,将表 1 中的参数代入式(6), $T_i$  依次取 0.002,0.005,0.01,0.02,0.05,0.1,利用 Matlab 计算工具作出电流内环闭环系统的根轨迹图,如图 5 所示。

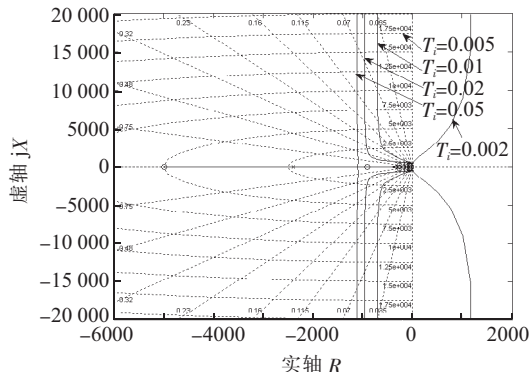


图 5 不同  $T_i$  时闭环系统的根轨迹图

由图 5 可知,只有在  $T_i > 0.005$ ,  $k_p$  大范围变化时,闭环系统均能保持稳定;只有  $T_i > 0.02$  时,才能在根轨迹上找到阻尼比大于 0.707 的闭环极点,保证闭环系统良好的动态性能;在  $T_i > 0.05$  时,根轨迹均垂直于实轴,也即此时  $T_i$  的增大对闭环系统调节时间是没有影响的。因此,最佳的时间常数  $T_i$  的取值范围应该为  $0.02 < T_i < 0.05$ 。

### 2.2 以 $k_r$ 为根轨迹增益

固定  $k_p, k_r$  变化时,由于  $k_r$  为非开环增益,因此根据闭环特征方程相同原则,得到以  $k_r$  为开环增益的等效开环传递函数:

$$G_{op}^*(s) = \frac{k_r \omega_c s}{(s^2 + \omega_c s + \omega_0^2) [k_p + (1.5T_i s + 1)(Ls + r)]} \quad (7)$$

$k_p$  依次取 0.2,0.4,0.6,0.8,1,利用 Matlab 计算工具作出电流内环闭环系统的根轨迹图,如图 6 所示。

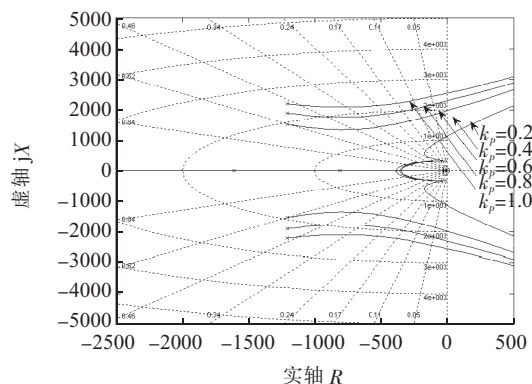


图 6 不同  $k_p$  时闭环系统的根轨迹图

由图 6 可知,对任意  $k_p$ ,当  $k_r$  增大到一定值时,也即  $T_i$  减小一定值时,闭环极点进入虚轴右边,控制系统失去稳定,与图 5 所得结论一致; $k_p < 0.4$  时(以  $k_p = 0.2$  为例),电流内环闭环系统存在 1 对共轭复数极点,2 个负极点,且闭环系统不存在阻尼比大于 0.707 的复数极点,因此  $k_p < 0.4$  不是比例系数的取值区间; $k_p > 0.4$  时,电流内环闭环系统均存在 2 对共轭复数极点,其中一对离虚轴较远,一对离虚轴较近,离虚轴较近的极点存在阻尼比大于 0.707 的区间;另外,在  $k_p > 0.6$ ,阻尼比为 0.707 时,离虚轴较近的极点没有明显的变化,也即此时  $k_p$  的增大不会带来动态性能的改善,最佳的比例系数  $k_p$  取值范围为  $0.4 < k_p < 0.6$ 。

### 2.3 电流内环控制性能

根据 2.1 和 2.2 节  $k_p$  和  $T_i$  的最佳取值范围,令  $k_p = 0.5$ ,  $T_i = 0.025$ ,也即  $k_r = 20$ ,求得相应电流内环闭环传递函数的 2 对复数极点为:

$$\begin{cases} s_{1,2} = -305 \pm j245 \\ s_{3,4} = -907 \pm j1106 \end{cases} \quad (8)$$

可见第二对复数极点距离虚轴距离是第一对复数极点距离虚轴距离的 3 倍,满足闭环控制系统主导极点设计要求,因此可以忽略第二对极点对闭环时间响应的影响<sup>[11]</sup>。利用 Matlab 工具分别对电流内环的开环和闭环传递函数做波特图,如图 7 和图 8 所示。

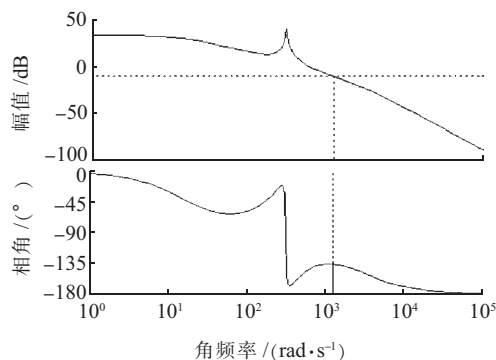


图 7 开环传递函数波特图



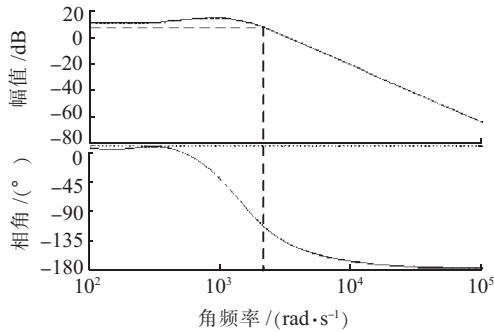
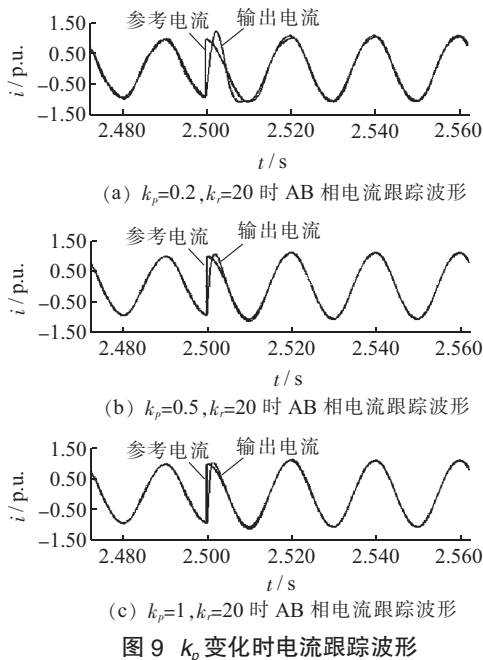


图8 闭环传递函数波特图

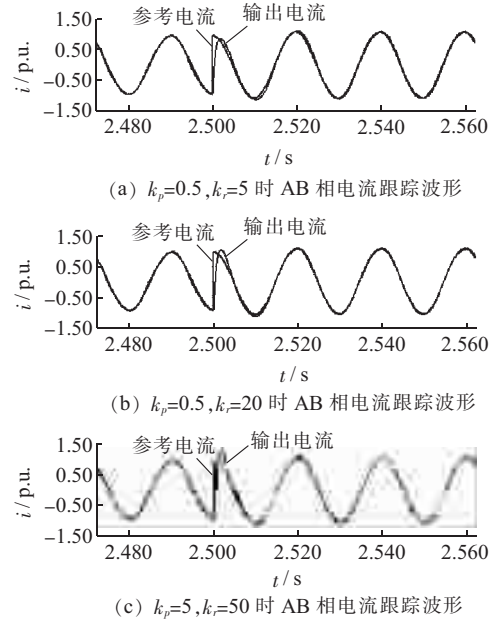
由图7和图8可知,开环系统幅值裕度无穷大,相角裕度 $44.4^\circ$ ,闭环系统带宽为 $2100/6.28=334$  Hz,是电网频率的6倍多,满足工程要求。

### 3 仿真实证

为验证本文所提基于根轨迹法的电流内环比例谐振控制器设计方法的正确性,在PSCAD/EMTDC环境中搭建 $\pm 100$  Mvar的链式STATCOM仿真平台,主回路参数如表1所示。直流电压平衡控制采用文献[12]提出的基于有功电压矢量叠加的直流电容电压平衡控制方法。以上一节中的 $k_p=0.5, k_r=20$ 为比较目标,分别固定 $k_r$ 、变化 $k_p$ ,固定 $k_p$ 、变化 $k_r$ ,得到STATCOM从额定容性无功瞬间阶跃到额定感性无功阶跃时的电流跟踪效果,如图9和图10所示。

图9  $k_p$ 变化时电流跟踪波形

由图9可知, $k_p$ 越小,输出电流超调越大,调节时间越长,但在 $k_p > 0.5$ 以后,增大 $k_p$ 对超调和调节时间改善作用很小;由图10可知,输出电流超调随 $k_r$ 的减小而减小, $k_r < 20$ 时,将会出现输出电流跟踪不上参考电流, $k_r > 20$ 时,输出电流将会出现较大的超调,且 $k_r$ 越大,超调越大,越容易失去稳定,调节时间与 $k_r$ 变化关系不大。

图10  $k_r$ 变化时电流跟踪波形

由图9和图10可知,比例谐振控制参数 $k_p=0.5, k_r=20$ ,较其他控制参数具有响应时间快,超调小,调节时间短等良好的动态性能,从而证明了采用根轨迹法进行比例谐振控制器设计的正确性。

### 4 结束语

比例谐振控制器能够在静止坐标系下对交流量进行无静差调节,无须 $dq$ 旋转坐标变换,无须正负序分解。本文采用闭环系统根轨迹法对链式STATCOM采用比例谐振控制电流内环控制器参数进行设计,该方法设计的电流控制器参数具有电流跟踪精度高、超调小、动态性能良好等优点。最后通过PSCAD/EMTDC仿真验证了所提比例谐振控制器参数设计方法的正确性和电流内环采用PR控制的优越性。

#### 参考文献:

- [1] 叶勇,陆路,李杰. STATCOM接入泰州电网仿真分析[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 35-37.
- [2] 胡兆庆,董云龙,田杰,等. 基于模块化多电平换流器结构的柔性直流控制策略[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(1): 5-9.
- [3] 江道灼,张振华. 三相H桥级联静止同步补偿器的控制策略[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 2024-2031.
- [4] 王轩,林嘉扬,滕乐天,等.  $d-q-o$ 坐标系下链式STATCOM电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(15): 48-54.
- [5] 王轩,傅坚,滕乐天,等. 链式静止同步补偿器电流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(12): 1-6.
- [6] 谢化安,王永源,万四维,等. 东莞变电站链式STATCOM控制保护的RTDS试验[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 117-122.
- [7] 王松,谈龙成,李耀华,等. 链式星形STATCOM补偿不平衡负载控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(27): 20-27.
- [8] 马琳,金新民,唐芬,等. 三相并网逆变器比例谐振控制及其

- [2] 胡家兵,贺益康,郭晓明,等.不平衡电压下双馈异步风力发电系统的建模与控制[J].电力系统及其自动化,2007,31(14):47-56.
- [3] 电网电压不平衡双馈风力发电机改进控制方法[J].电力系统及其自动化学报,2011,23(4):48-56.
- [4] 胡家兵,贺益康,王宏胜,等.不平衡电网电压下双馈感应发电机转子侧变流器的比例—谐振电流控制策略[J].中国电机工程学报,2010,30(6):48-56.
- [5] 郑艳文,李永东,柴建云,等.不平衡电压下双馈发电系统控制策略[J].电力系统自动化,2009,33(15):89-93.
- [6] 邹冬临,余岳,徐凤星,等.电网电压不对称跌落下双馈风力发电机机侧变流器控制策略的研究[J].电机与控制学报,2012,39(10):45-58.
- [7] 陈思哲,章云,吴捷,等.不平衡电网电压下双馈风力发电系统的比例—积分—谐振并网控制[J].电网技术,2012,36(8):62-68.
- [8] 马宏伟,李永东,许烈.不对称电网电压下双馈风力发电机的控制方法[J].电力自动化设备,2013,33(7):12-18.
- [9] 李辉,杨顺昌,廖勇.并网型双馈发电机电网电压定向励磁控制的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(8):87-90.
- [10] 范立新,向张飏.双馈变速恒频风力发电机并网控制仿真研究[J].江苏电机工程,2012,31(6):39-42.

#### 作者简介:

刘国华(1972),男,江苏南京人,高级工程师,从事发电机励磁和风电控制研究工作;

洪丹(1990),女,江西上饶人,助理工程师,从事风力发电控制技术工作;

王瑞(1988),女,河南郑州人,工程师,从事风力发电控制技术工作;

孙素娟(1983),女,山东济宁人,工程师,从事风力发电控制技术工作。

## A Control Method for Rotor-Side Converter of DFIG under Unbalanced Grid Voltage Condition

LIU Guohua, HONG Dan, WANG Rui, SUN Sujuan  
(NARI Group Corporation, Nanjing 211006, China)

**Abstract:** On the basis of the mathematical model for doubly-fed induction generator (DFIG) in positive and negative dual synchronously rotating frames under unbalanced grid-voltage, a control method for rotor-side converter is proposed, which chooses constant electromagnetic torque as the control target and uses proportional-integral-resonant (PIR) controller as the rotor current controller. Without PI controller in synchronously rotating frame and inner loop of rotor current, the control structure is simple and easy for practical use. Besides, the controllable range of unbalance has been analyzed. Simulation results verify the validity of theoretical analysis and the efficiency of rotor current PIR controller.

**Key words:** doubly-fed induction generator; unbalanced grid voltage; smooth electromagnetic torque; proportional-integral-resonant (PIR) controller

(上接第4页)

- 网压前馈问题分析[J].电工技术学报,2012,27(8):57-63.
- [9] 张建坡,赵成勇,敬华兵.比例谐振控制器在MMC-HVDC控制中的仿真研究[J].中国电机工程学报,2013,33(21):53-62.
- [10] 李子欣,李耀华,王平,等.PWM整流器在静止坐标系下的准直接功率控制[J].中国电机工程学报,2010,30(9):47-54.
- [11] 刘钊,刘邦银,段善旭,等.链式静止同步补偿器的直流电容电压平衡控制[J].中国电机工程学报,2009,29(30):7-12.

黄华(1984),男,江苏南通人,工程师,从事无功补偿相关技术研究工作;

周波达(1967),男,浙江舟山人,高级工程师,从事电力系统生产管理;

费建平(1962),男,浙江舟山人,工程师,从事电网运行管理工作;

陈亦汉(1962),男,陕西西安人,高级工程师,从事无功补偿相关技术研究工作;

刘磊(1984),男,陕西榆林人,工程师,从事无功补偿相关技术研究工作。

作者简介:

## Design of Current Proportional-Resonant Controller for Chained STATCOM Basing on Root-Locus Method

HUANG Hua<sup>1</sup>, ZHOU Boda<sup>2</sup>, FEI Jianping<sup>2</sup>, CHEN Chihan<sup>1</sup>, LIU Lei<sup>1</sup>  
(1.Nari-Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Zhoushan Power Supply Company State Grid Zhejiang Electric Power Company, Zhoushan 316021, China)

**Abstract:** Chained static synchronous compensator and its phase current control is a common method for the unbalanced problem of power grid and load. This paper proposes a method to employ proportion-resonance integration to trace phase current. Also, a design method for controller parameters selection using closed loop system's root locus, which can not only meet the stability requirement of current inner loop's closed loop system, but also have excellent dynamic performance is provided based on the mathematic model of STATCOM. Finally, PSCAD/EMTDC Simulation results verify the correctness of proportion-resonance integration controller's parameter selection method based on root locus method.

**Key words:** STATCOM; proportion-resonant; phase current control; root-locus method