

DOI: 10.7667/PSPC150841

UPFC 无功潮流控制引起负交互影响的解决方法

刘青¹, 马朋¹, 邹家平²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 河北 保定 071003;

2. 广东国华粤电台山发电有限公司, 广东 台山 529228)

摘要: 针对 UPFC 内部多个 SISO 控制器单独运行效果良好, 但联合运行时各控制器间存在负交互影响的问题, 对 UPFC 各控制器间的工作关系进行了详细分析。结果表明, 无功潮流控制引起的负交互影响程度与有功、无功控制器间的耦合程度有关。根据负交互影响存在的原因, 应用分层结构设计了潮流解耦控制器, 其中外层控制为内层控制提供参考信号, 内层控制应用解耦控制策略来实现有功、无功解耦的功能。利用 PSCAD 建立了 UPFC 的动态模型, 比较分别采用以有功、无功电压为控制目标的常规潮流控制器及潮流解耦控制器时的仿真结果。验证了潮流解耦控制器的优越性, 可有效解决无功潮流调节时与其他控制器间的负交互影响问题。

关键词: UPFC; 负交互影响; 耦合程度; 潮流解耦控制器; PSCAD

Solution to negative interaction caused by reactive power flow controlling of UPFC

LIU Qing¹, MA Peng¹, ZOU Jiaping²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Source (North China

Electric Power University), North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Guohua Yuedian Taishan Power Generation Company Ltd., Taishan 529228, China)

Abstract: Unified Power Flow Controller (UPFC) contains multiple SISO controllers. These controllers run separately to good effect. When they jointly run, there are negative interactions between each controller. This paper analyzes working relations between each controller of UPFC. The results show that negative interactions, caused by reactive power flow control, relative to the degree of coupling between active and reactive power controllers. Then, depending on the cause of negative interaction, we design current decoupling controller using hierarchical structure. The outer controller provides reference signal for inner controller. The inner controller applies decoupling control strategy to realize the decoupling function. Finally, this paper establishes dynamic model of UPFC in PSCAD, and compares the simulation results of conventional power flow controller and trend decoupling controller. The results verify the superiority of trend decoupling controller, which can effectively solve negative interaction problems caused by reactive power regulation.

Key words: UPFC; negative interaction; degree of coupling; current decoupling controller; PSCAD

0 引言

FACTS(Flexible AC Transmission Systems)设备一般有多个输入、输出量。有时单个或多个输入量会影响单个或一系列输出量。若这种交互影响增强了控制效果, 即称为正交互影响; 若这种交互影响弱化了控制效果甚至使系统失稳, 即称为负交互影响。而统一潮流控制器(Unified Power Flow Controller, UPFC)作为迄今为止通用性最好的 FACTS 装置, 其内部包含多个实现电压调节、潮流控制等不同功能的 SISO 控制器, 这些控制器单独

运行效果良好, 但联合运行时各控制器间存在负交互影响, 严重时会导致闭环系统失去稳定^[1]。

UPFC 的串联侧变流器在潮流调节工作模式下, 常规潮流控制策略大致分为将控制目标转化为有功、无功电流值或转化为有功、无功电压值两种方法^[2-3], 且均基于本地测量量进行设计, 有一定的局限性。目前文献中采用的 UPFC 交互影响分析方法^[4], 例如基于规范形的方法、相对增益矩阵法等, 仅能根据所选交互指标分析出控制器间负交互的程度, 并未分析出交互影响存在的根本原因。在解决 UPFC 各控制器间交互影响方面, 多目标粒子群优

化算法, 变参数设计方等^[5-6]法均从调整 UPFC 中多个控制器的参数入手来减小控制器间产生的负交互影响, 但仍存在控制器参数调整对消除交互影响不理想的情况, 故 UPFC 各控制器间负交互影响的解决方法仍有待进一步研究。

本文从 UPFC 各控制器的工作原理着手, 详细分析了各控制器间的关系, 表明无功潮流控制引起的负交互影响程度与串联侧有功、无功控制器的耦合程度有关; 进而采用分层结构设计了潮流解耦控制器; 最后, 与以有功、无功电压为控制目标的常规潮流控制器进行对比, 仿真验证了潮流解耦控制器的优越性, 此方法可有效解决无功潮流调节时与其他控制器间的负交互影响问题。

1 UPFC 内部控制器间交互影响理论分析

1.1 UPFC 工作的基本原理

UPFC 的工作原理如图 1 所示。UPFC 主要由两个变流器 VSC1、VSC2 构成, 两者通过直流电容 C_{dc} 连接成背靠背的形式, 每个变流器都可与交流系统交换无功功率。UPFC 实现潮流控制的矢量图如图 2 所示。VSC2 注入电压矢量 \dot{U}_{pq} 的幅值 U_{pq} ($0 \leq U_{pq} \leq U_{pqmax}$) 和相位角 γ ($0 \leq \gamma \leq 2\pi$) 都是可控的, 圆形区域即为线路可获得潮流补偿的区域。

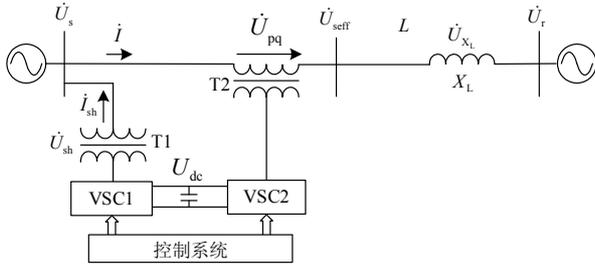


图 1 UPFC 工作原理

Fig. 1 Working principle of UPFC

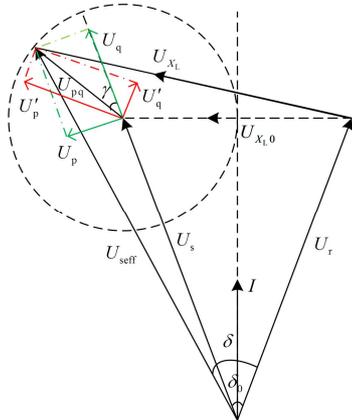


图 2 UPFC 实现潮流控制功能

Fig. 2 Flow control function of UPFC

UPFC 同时具备 STATCOM 和 SSSC 的特点, 具有独立控制有功功率、无功功率及电压的功能, UPFC 可以根据系统需求, 选择不同功能的组合作为其控制目标。

1.2 UPFC 内控制器间交互影响关系分析

1.2.1 UPFC 并联侧线路输送功率

对图 1 所示两机系统, 以 U'_r 为参考电压, 且忽略输电线路上的有功损耗, 从送端侧考虑, 线路输送的有功功率为

$$P_1 = \frac{U'_s U'_r}{X_L} \sin \delta_0 \quad (1)$$

式中: δ_0 为 UPFC 未补偿时系统两端相位差; U'_s 为 UPFC 无功补偿后送端 \dot{U}_s 的幅值。

如果 VSC1 容量足够, 能够维持母线电压为 U , 则由式(1)知线路能输送的有功功率为

$$P_{10} = \frac{U^2}{X_L} \sin \delta_0 \quad (2)$$

而 $\dot{U}'_s = U'_s e^{j\delta_0}$, VSC1 发出的无功功率可用无功电流源代替^[7], 则有

$$\dot{U}'_s = \dot{U}_s + jI_{sh} X_L \quad (3)$$

VSC1 注入的无功功率为

$$Q_{sh} = \text{Im} \left(\dot{U}_s \frac{\dot{U}'_s^* - \dot{U}_s^*}{-jX_{sh}} \right) = I_{sh} U_s \quad (4)$$

当 VSC1 相当于电容向系统发无功时, 滞后 \dot{U}'_s 90° , 由式(3)可得

$$\dot{U}'_s = (U + I_{sh} X_L) \angle \delta_0 \quad (5)$$

将式(5)代入式(1), 线路输送的有功功率为

$$\begin{cases} P_1 = P_{10} + P_{sh} \\ P_{sh} = UI_{sh} \sin \delta_0 \end{cases} \quad (6)$$

VSC1 通过向系统注入式(4)所示的无功功率, 对母线节点电压 \dot{U}_s 的幅值进行调节, P_1 的变化量随 I_{sh} 极性、大小的改变呈正比变化。

1.2.2 UPFC 串联侧线路输送功率

从受端侧考虑, 线路输送功率 P_2 和受端提供的无功功率 $-jQ_2$ 之和为

$$P_2 - jQ_2 = U_r \left(\frac{U_s - U_r}{jX_L} \right)^* + \frac{U_r U_{pq}^*}{-jX_L} \quad (7)$$

其中 $\dot{U}_s = U e^{j\delta_0} = U (\cos \delta_0 + j \sin \delta_0)$ (8)

$$\dot{U}_r = U e^{j0} = U \quad (9)$$

$$\dot{U}_{pq} = U_{pq} e^{j(\delta_0 + \gamma)} = U_{pq} [\cos(\delta_0 + \gamma) + j \sin(\delta_0 + \gamma)] \quad (10)$$

将式(8)~式(10)代入式(7), 得

$$\begin{cases} P_2 = P_{20} + P_{se} \\ P_{se} = \frac{UU_{pq} \sin(\delta_0 + \gamma)}{X_L} = \frac{UU'_p}{X_L} \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} Q_2 = Q_{20} + Q_{se} \\ Q_{se} = -\frac{UU_{pq} \cos(\delta_0 + \gamma)}{X_L} = -\frac{UU'_q}{X_L} \end{cases} \quad (12)$$

式中, P_{se} 、 Q_{se} 为 UPFC 对输电线路的功率调节量。

VSC2 侧注入电压 \dot{U}_{pq} 后, UPFC 对输电线路电压降落的幅值和相角产生影响, 当 \dot{U}_{pq} 的相角 $\gamma + \delta_0$ 和幅值 U_{pq} 改变时, 线路输送的有功功率和无功功率均随之改变。

1.2.3 直流电容传输的功率

C_{dc} 起稳定变流器直流电压的作用, VSC1 通过 C_{dc} 向 VSC2 提供有功功率, C_{dc} 的有功功率^[8-9]为

$$P_{dc} = 2\sqrt{2}\omega\lambda CU_{dc}^2 \cos\varphi \quad (13)$$

式中: φ 为 \dot{U}_{pq} 与 \dot{i} 之间的功率因数角; λ 为系统要求的二次谐波电流在电容上引起的谐波电压限定为输出直流电压的 λ 倍。

因此, 电容上的有功功率随直流电压 U_{dc} 的变化而改变。

1.2.4 UPFC 各控制器控制变量间的关系

电压型变流器的交流侧瞬时功率等于直流侧瞬时功率, 且 VSC2 调整线路所需有功功率由 VSC1 侧提供, VSC1、VSC2 及直流电容的工作关系可由式(6)、式(11)、式(13)得

$$|P_{sh}| = |P_{se}| = |P_{dc}| \quad (14)$$

$$\text{即 } |UI_{sh} \sin\delta_0| = \left| \frac{UU_{pq} \sin(\delta_0 + \gamma)}{X_L} \right| = |2\sqrt{2}\omega\lambda CU_{dc}^2 \cos\varphi| \quad (15)$$

由上述分析可知:

(1) 由式(11)、式(15)可看出, VSC2 调节线路有功潮流会对 UPFC 连接母线节点电压及电容电压带来影响;

(2) UPFC 的连接电容 C_{dc} 仅能传输有功功率, 故 VSC2 调节线路无功潮流与 UPFC 连接母线节点电压及电容电压无直接联系, 但由式(11)、式(12)知, P_{se} 、 Q_{se} 均为 U_{pq} 和 γ 的函数, 两者间存在耦合, 当 $Q_{se} = U_{pq} \cos(\delta_0 + \gamma)$ 变化, U_{pq} 、 γ 会改变, P_{se} 值也会相应改变, 由式(15)知, 若 Q_{se} 影响 P_{se} 增大, 会导致 VSC1 注入无功电流 I_{sh} 增大, 进而引起母线电压 U_s 变大, 同时电容电压 U_{dc} 也会变大, 当 Q_{se} 影响 P_{se} 减小, 变化规律与上述相反。故 Q_{se} 变化会引起 U_s 、 U_{dc} 变化, 即 UPFC 中潮流控制器根

据系统需要进行无功调节, 会给其他控制器带来影响, 而交互影响程度与有功、无功控制的耦合程度有关。

2 负交互影响的解决方法

2.1 无功潮流控制引起负交互影响的解决方法

以有功、无功电压为控制目标的常规潮流控制器, 将 VSC2 的输出电压 \dot{U}_{pq} 分解为与首端电压 \dot{U}_s 同相的分量 U_q 和垂直的分量 U_p , 可通过分别调整 U_p 和 U_q 的大小, 来控制线路上的 P 和 Q 。而 $U_p = U_{pq} \sin\gamma$ 、 $U_q = U_{pq} \cos\gamma$ 无法达到式(11)、式(12)中将有功、无功潮流控制分量完全分离, 两者之间存在耦合, 耦合越重, 控制器间交互影响程度越深。关于将控制目标转化为有功、无功电压值的常规潮流控制器, 文献[3]中已进行了详细描述, 此处不再赘述。

如图 2 所示, 若将 \dot{U}_{pq} 分解为与末端电压 \dot{U}_r 同向及垂直的分量分别控制无功及有功潮流, 可实现有功、无功电压之间的解耦。因为从有功表达式(11)来看, 串联侧电压与线路末端电压同向的分量 U'_q 对 P_2 没有影响, 因此, 通过改变 U'_q 来调节线路无功, 有功不会发生变化。故 VSC2 有功、无功控制器之间的交互影响(进而对并联侧控制器的影响)问题可通过对串联侧潮流控制器进行解耦控制来解决。

2.2 潮流解耦控制器的设计

将潮流解耦控制器分内、外两层来进行设计。外层控制为内层控制提供参考值; 内层控制将控制目标转化为以 U'_r 为参考的有功、无功电压值, 不局限于本地测量, 且利于实现有功、无功的解耦。分层控制结构如图 3 所示。

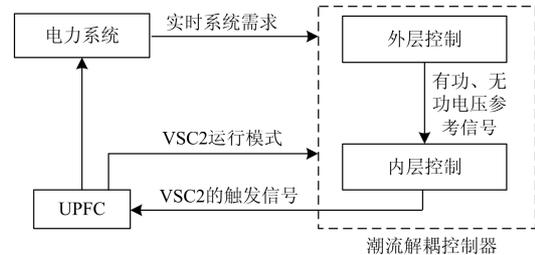


图 3 分层控制结构

Fig. 3 Structure of hierarchical control

(1) 外层控制根据 UPFC 的运行状态, 利用含 UPFC 的潮流计算^[10]确定系统所期望的 P 、 Q , 进而计算出 U'_{pref} 、 U'_{qref} 的设定值, 为内层控制提供该运行模式的参考跟踪信号 U'_{pref} 及 U'_{qref} ;

(2) 内层控制则对外层给出的参考信号 U'_{pref} 、

U'_{qref} 快速正确地进行反应, 提供给 VSC2 的开关元件 IGBT 的触发信号, 从而使得 UPFC 装置在交流侧的输出能达到系统的需求。

2.2.1 外层控制

外层控制策略如图 4 所示, 根据实时采集的电网数据经潮流计算或根据上级调度部门指令, 得到线路需要实时调节的系统潮流 P_{ref} 、 Q_{ref} , 根据式 (11)、式(12)计算 VSC2 需注入的有功、无功电压 U'_{pref} 和 U'_{qref} (即 $U'_{pref} = \frac{P_{sc} X_L}{U}$, $U'_{qref} = \frac{Q_{sc} X_L}{U}$) 为内层控制提供参考信号。但需注意, UPFC 的潮流控制和电压控制, 必须受电力系统稳定性约束, 只能是有限范围内的控制。

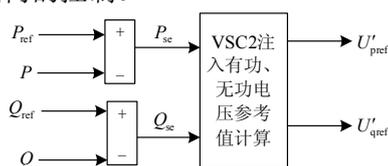


图 4 外层控制策略

Fig. 4 Control strategy of outer layer

2.2.2 内层解耦控制

内层解耦控制策略如图 5 所示, 输入变量有末端电压 \dot{U}_r 、补偿电压 \dot{U}_{pq} 、有功参考电压 U'_{pref} 和无功参考电压 U'_{qref} 。内部控制与线路电流的同步采用 PLL 电路^[11]来实现, 该同步信号 $+\pi/2$ 或 $-\pi/2$ 移相后,

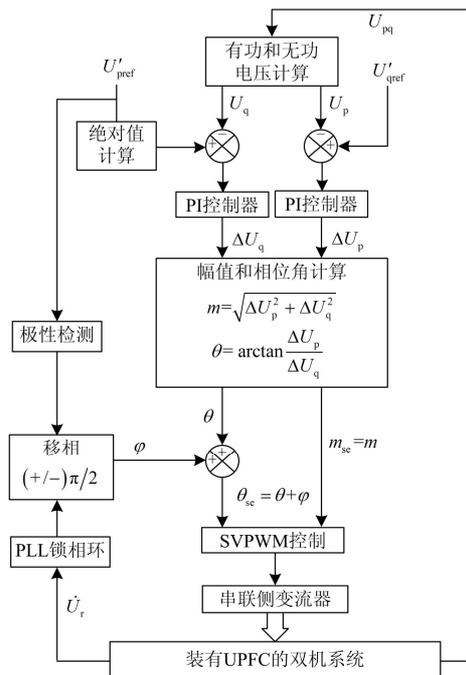


图 5 内层解耦控制策略

Fig. 5 Decoupling control strategy of inner layer

为系统提供同步信号 φ 。移相器根据极性检测器的输出进行工作, 以此来确定有功电压参考输入 U_{pref} 是容性还是感性。补偿电压通过闭环控制回路来实现, 而每个控制应用 PI 控制器来实现^[11], 得出相应的 θ_{sc} 、 m_{sc} 后, 采用 SPWM 调制方法, 开关频率为 5 kHz, 得到 VSC2 开关元件 IGBT 的触发信号。

内层解耦控制中, \dot{U}_{pq} 需要以线路末端电压为参考进行有功、无功电压计算, 针对末端电压相量相对较难实时检测的问题, 在系统安装 UPFC 的母线配置 PMU, 则 UPFC 所在线路的末端节点电压相量就是可观的^[12], 不需进行任何迭代计算, 广域测量信息的实时性和准确性, 可极大地提高 UPFC 潮流控制器调节所在线路潮流的速度及精确度。

3 仿真分析与验证

3.1 UPFC 仿真模型

利用 PSCAD 建立的含 UPFC 的 220 kV 双电源仿真系统如图 6 所示, UPFC 中, 并联侧 T1 变比为 220 kV/20 kV, 容量为 100 MVA, Y/Δ-11 接法; 串联侧 T2 变比为 20 kV/220 kV, 容量为 100 MVA, 直流侧电容 $C_d=2000 \mu F$; 输电线路长度 L 为 200 km, 线路参数为 $Z_1=Z_2=0.035744+j0.507762 \Omega/\text{km}$, $Z_0=0.363152+j1.326473 \Omega/\text{km}$ 。

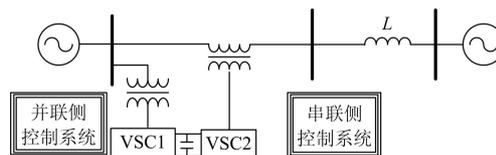


图 6 含 UPFC 的双机系统

Fig. 6 Two-generator system including UPFC

仿真中, 根据线路功率初始值得到的参考值为: $U_{pref}=0.2 \text{ p.u.}$, $U_{qref}=0.1 \text{ p.u.}$, $U_{acref}=1.0 \text{ p.u.}$, $U_{dcref}=25 \text{ kV}$ 。应用文献[13]中遗传算法优化 PID 控制器参数的方法, 对 PI 控制器参数进行设置, 以保证不会因为 PI 控制器参数不合理造成控制器运行不稳定, 由于本文中只用到了 PI 控制器, 故认为 D 为 0, 各 PI 控制器的参数如表 1 所示。

表 1 各 PI 控制器的参数

Table 1 Parameters of the PI controller

PI 调节参数			
常规潮流控制器	母线电压控制	$K_{aci}=0.1$	$K_{acp}=3.5$
	直流电压控制	$K_{dci}=0.4$	$K_{dcp}=0.2$
	有功电压控制	$K_{pi}=0.6385$	$K_{pp}=0.75$
潮流解耦控制器	无功电压控制	$K_{qi}=0.618$	$K_{qp}=0.93$
	有功电压控制	$K'_{pi}=0.4285$	$K'_{pp}=0.8$
	无功电压控制	$K'_{qi}=0.562$	$K'_{qp}=0.9$

3.2 UPFC 应用两种潮流控制器的仿真分析

UPFC 分别采用文献[4]中的常规潮流控制器及本文所设计潮流解耦控制器, 串、并联侧控制器全部闭环运行, 对输电线路无功潮流进行调整控制。

仿真中的扰动设定:

- (a) 小扰动, 无功电压的参考值 V_{qref} 从 0.1 p.u. 调到 0.4 p.u., 其他控制器参考值不变;
- (b) 大扰动, 无功电压的参考值 V_{qref} 从 0.1 p.u. 调到 0.7 p.u., 其他控制器参考值不变。

小扰动情况下, 仿真结果对比如图 7 所示。

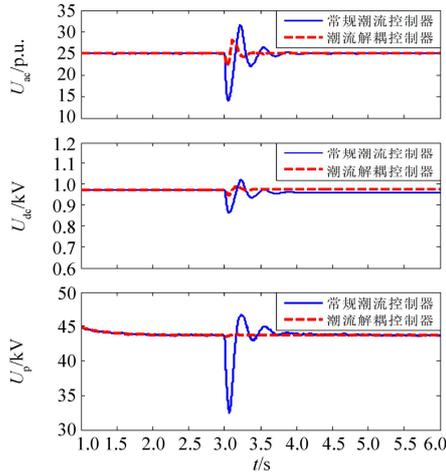


图 7 小扰动情况下两种控制器仿真对比

Fig. 7 Simulation comparison with small disturbance

仿真开始 0.5 s 后系统稳定运行, 母线电压幅值为 0.97 p.u., 电容电压维持参考值 25 kV, 有功电压为 44 kV, 3 s 时, 应用常规潮流控制器的母线电压骤降到 0.862 p.u., 电容电压骤降到 14.09 kV, 有功电压骤降到 32.25 kV, 随后三者均进行衰减, 最终稳定; 应用潮流解耦控制器后, 3 s 时 UPFC 接入点母线电压、电容电压及有功电压均出现衰减振荡且最大波动对应值分别为 0.948 p.u.、22.77 kV、43.40 kV, 最终趋于稳定。

大扰动情况下, 仿真结果对比如图 8 所示。

UPFC 应用常规潮流控制器, 3 s 时 UPFC 接入点母线电压、电容电压及有功电压均出现持续大幅波动, 且最大波动对应值分别为 0.749 p.u.、4.98 kV、0.95 kV; 应用潮流解耦控制器后, 3 s 时母线电压、电容电压及有功电压均出现小幅波动后逐渐稳定, 且最大波动对应值分别为 0.946 p.u.、20.8 kV、42.95 kV。

3.3 两种潮流控制器仿真结果对比

应用常规潮流控制器和潮流解耦控制器, UPFC 无功潮流调节引起交互影响的仿真结果对比如表 2 所示, 用电压值与标准值的相对偏差百分比来表征电压波动情况。根据电能质量国家标准^[14], 标称电压为 220 kV 的高压系统, 电压波动的最大限值为 2.5%。

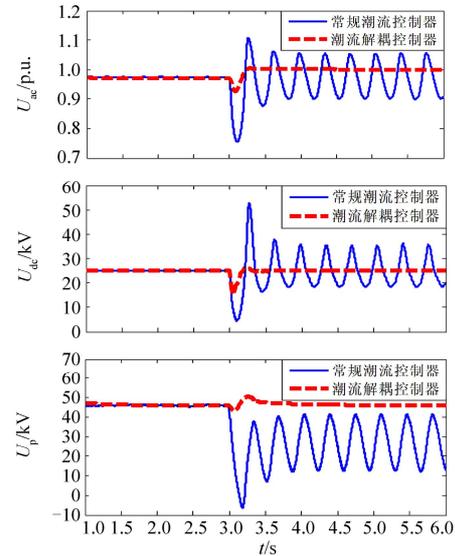


图 8 大扰动情况下两种控制器仿真对比

Fig. 8 Simulation comparison with large disturbance

表 2 两种控制器产生的交互影响对比

Table 2 Controller interaction comparison of two controllers

		与标准值的相对偏差百分比		
控制器类型		U_s	U_{dc}	U_p
小扰动	常规潮流控制器	10.8% > 2.5%	43.64%	26.7%
	潮流解耦控制器	2.2% < 2.5%	8.92%	1.36%
大扰动	常规潮流控制器	22.1% >> 2.5%	80.8%	97.8%
	潮流解耦控制器	2.4% < 2.5%	16.8%	2.38%

由上述仿真结果对比可知:

(1) UPFC 采用常规潮流控制器进行无功潮流调节, 由于有功、无功电压耦合较重, 进而与 UPFC 内其他控制器间交互影响引起的电压波动不符合电能质量国家标准, 从而降低了电能质量, 且会危及电容器的安全运行, 严重时会使系统失去稳定。

(2) UPFC 采用潮流解耦控制器后, 有功、无功电压耦合程度很小, 与各控制器间交互影响引起的电压波动产生的影响几乎可忽略不计。故应用潮流解耦控制器可有效解决无功潮流控制带来的负交互影响问题。

4 结论

(1) 根据 UPFC 各控制器间的相互关系, 分析出 UPFC 无功潮流调节时, 串联侧有功、无功控制的耦合程度是控制器间存在负交互影响的根本原因。

(2) 采用分层结构设计了潮流解耦控制器, 外层控制为内层控制提供参考信号, 内层控制应用解耦控制策略来实现有功、无功解耦的功能。

(3) UPFC 分别采用以有功、无功电压为控制目

标的常规潮流控制器和潮流解耦控制器进行仿真对比,表明潮流解耦控制器可有效解决无功潮流调节时给其他控制器带来的负交互影响问题。

参考文献

- [1] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different typrs of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.
- [2] 吉兴全, 刘莎莎, 刘贵彬, 等. 基于 PSCAD 统一潮流控制器的建模与仿真[J]. 电气技术, 2014(3): 10-13.
JI Xingquan, LIU Shasha, LIU Guibin, et al. Modeling and simulation of unified power flow controller based on PSCAD[J]. Electrical Engineering, 2014(3): 10-13.
- [3] 邹振宇. 多灵活交流输电控制器间交互影响分析及其协调控制研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [4] 李海琛, 董萍, 刘明波, 等. 基于线性化模型的含 FACTS 装置的电力系统相对增益矩阵求解及应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 76-82.
LI Haichen, DONG Ping, LIU Mingbo, et al. Solving and application of relative gain array in power system with FACTS devices installation based on linear model[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 76-82.
- [5] 王金全, 黄丽, 杨毅. 基于多目标粒子群算法的微电网优化调度[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(1): 49-54.
WANG Jinquan, HUANG Li, YANG Yi. Optimal dispatch of microgrid based on multi-objective particle swarm optimization[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(1): 49-54.
- [6] 鹿建成, 李啸骢, 黄维, 等. 基于 SSSC 和励磁协调抑制次同步振荡的线性最优控制器设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 21-27.
LU Jiancheng, LI Xiacong, HUANG Wei, et al. Linear optimal controller of static series synchronous compensator and excitation to suppress sub-synchronous oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 21-27.
- [7] 罗承廉, 纪勇, 刘遵义. 静止同步补偿器(STATCOM)的原理与实现[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [8] 姚致清, 于飞, 赵倩, 等. 基于模块化多电平换流器的大型光伏并网系统仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(36): 27-33.
YAO Zhiqing, YU Fei, ZHAO Qian, et al. Simulation research on large-scale PV grid-connected systems based on MMC[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(36): 27-33.
- [9] 裴雪军, 陈材, 康勇. 三相电压源逆变器直流侧支撑电容的电压脉动分析与设计[J]. 电工技术学报, 2014, 29(3): 254-259.
PEI Xuejun, CHEN Cai, KANG Yong. Analysis of voltage ripple and design for DC-link capacitor in three-phase voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(3): 254-259.
- [10] 陈业飞, 李林川, 张芳, 等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 69-74.
CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.
- [11] 王宝安, 白晨阳, 陈豪, 等. 基于 CPS-SVPWM 调制的链式 STATCOM 直流侧电压控制策略[J]. 高压电器, 2015, 51(12): 168-173.
WANG Bao'an, BAI Chenyang, CHEN Hao, et al. Cascade-STATCOM DC voltage control strategy based on CPS-SVPWM modulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(12): 168-173.
- [12] 董雷, 张昭, 蒲天骄, 等. 基于 PMU 量测信息的电压稳定在线评估指标[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(11): 1-6.
DONG Lei, ZHANG Zhao, PU Tianjiao, et al. An online voltage stability index based on measuring information of phasor measurement unit[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(11): 1-6.
- [13] 吴红斌, 杨仪松, 丁明, 等. 遗传算法在 UPFC 的 PID 控制器参数优化中应用[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(2): 24-27.
WU Hongbin, YANG Yisong, DING Ming, et al. Application of GA in PID parameter optimization in UPFC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(2): 24-27.
- [14] GB/T12326—2008 电能质量 电压波动和闪变[S].

收稿日期: 2015-05-19; 修回日期: 2015-07-08

作者简介:

刘青(1974-), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统继电保护, 电力系统安全防御与恢复控制;

马朋(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为柔性交流输电与智能电网; E-mail: 993391677@qq.com

邹家平(1990-), 男, 助理电气工程师, 主要从事发电厂自动化设备的维护管理工作。

(编辑 姜新丽)