

引入故障恢复信号的 VSC-HVDC 附加阻尼控制研究

王振浩¹, 李洋¹, 高凯², 韩子娇², 王朝斌¹, 李国庆¹, 侯喜凤³

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 辽宁省电力有限公司, 辽宁 沈阳 110006;
3. 吉林省电力有限公司检修公司, 吉林 长春 130033)

摘要: 基于电压源型换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)具有快速、灵活的有功功率和无功功率控制能力。VSC-HVDC 附加阻尼控制能有效地抑制交流系统的低频振荡。讨论了附加阻尼控制器的限幅环节对控制效果的影响, 然后提出了引入故障恢复信号的附加阻尼控制。故障恢复信号为指数规律衰减信号, 将其与附加阻尼控制器输出信号叠加, 作为直流功率调制的参考信号, 以减小直流功率调制前期的直流功率幅值。并在直流电压波动的允许范围内, 使直流功率调制过程趋于理想的自由衰减振荡, 比无故障恢复信号的附加阻尼控制衰减更快, 从而显著减小限幅环节的影响。还给出了直流电压波动随直流功率波动变化的关系曲线。仿真结果验证了所提附加阻尼控制方法的有效性。

关键词: 电力系统低频振荡; VSC-HVDC; 附加阻尼控制; 限幅环节; 故障恢复信号

Study of using fault recovery signal for additional damping controller of VSC-based HVDC transmission system

WANG Zhenhao¹, LI Yang¹, GAO Kai², HAN Zijiao², WANG Chaobin¹, LI Guoqing¹, HOU Xifeng³

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China; 2. Liaoning Electric Power Company Limited, Shenyang 110006, China; 3. Maintenance Company of Jilin Electric Power Company Limited, Changchun 130033, China)

Abstract: The VSC-based high voltage DC transmission (VSC-HVDC) has the capability of fast and flexible active and reactive power control. VSC-HVDC with additional damping controller can effectively suppress low-frequency oscillation of AC system. This paper discusses how the magnitude limiter in the damping controller influences control effect, then proposes a new method of using fault recovery signal for damping controller. The fault recovery signal is a kind of exponentially decay power. By adding it to output of the damping controller as the DC power reference can reduce the magnitude of DC power at early stage of DC power modulation. Within range of allowed DC voltage ripple, the DC power modulation tends to be in an ideal free damping state, damping more rapidly in comparison with additional damping controller without fault recovery signal. Thus the influence of limiter is significantly reduced. This paper also gives the relationship curve of DC power ripple and DC voltage ripple. Simulation results validate the effectiveness of the proposed damping controller.

Key words: low-frequency oscillation of power system; VSC-HVDC; additional damping control; magnitude limiter; fault recovery signal

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)21-0034-07

0 引言

基于电压源型换流器的高压直流输电技术能够快速, 独立地控制有功功率和无功功率, 动态补偿交流母线的无功功率, 实现交流电压调节, 因而

VSC-HVDC 已广泛应用在大规模风电并网, 电网互联, 城市配网增容及电能质量提高等领域^[1-3]。

与静止无功补偿器(SVC)、静止无功发生器(STATCOM)以及统一潮流控制器(UPFC)等 FACTS 装置^[4-6]类似, 在交直流混联系统中, 利用 VSC-HVDC 附加阻尼控制, 增大系统振荡阻尼, 能有效抑制系统低频振荡, 提高系统稳定性^[7-10]。

大量文献提出了不同的 HVDC 附加阻尼控制

基金项目: 2014 国网公司科技项目“柔性环网控制器关键技术研究及示范应用”(2014GW-05)

器的设计方案^[11], 它们主要都是单输入单输出结构, 而且输入信号有多种形式。例如, 文献[12]以交流传输功率为输入信号, 提出基于 Prony 辨识的附加阻尼控制器设计方法, 对时域响应数据进行 Prony 辨识获取其等值降阶传递函数, 再利用极点配置法设计阻尼控制器参数。而文献[13]利用系统幅频、相频响应曲线, 通过对频率响应辨识获取系统的开环传递函数。文献[14]构建了基于典型两机系统的非线性直流调制和常规双侧频率功率调制控制器, 并指出常规双侧频率功率调制对电网运行的适应性更好。

上述文献中所设计的附加阻尼控制器虽然参数合理, 但都由于附加阻尼控制器中限幅环节的影响, 可能导致直流功率调制达不到预期设计效果。这是由于系统发生低频振荡时, 由于附加阻尼控制的作用, 换流器阀可能会出现周期性过负荷以及直流电压波动过大, 为了防止此现象的发生, 附加阻尼控制器增加了限幅环节, 由此导致调制后的直流功率只能在上下限值之间振荡衰减, 而不是理想的自由振荡衰减。

针对限幅环节的影响, 本文提出了引入故障恢复信号的 VSC-HVDC 附加阻尼控制方法。选取 VSC 的有功功率设定值为输入信号, 交流线路传输的有功功率为输出信号, 利用 Prony 辨识方法与极点配置法设计了 VSC-HVDC 附加阻尼控制器。在附加阻尼控制器输出信号上叠加故障恢复信号, 减小直流功率调制振荡前期的直流功率幅值, 且在直流电压波动的允许范围内, 使直流功率调制过程为自由衰减振荡, 衰减速度变快, 从而显著减小限幅环节对控制效果的影响。

1 VSC-HVDC 系统基本特性分析

1.1 VSC-HVDC 交直流混联试验系统及直流模型

本文中基于 VSC-HVDC 的交直流混联试验系统, 如图 1 所示。试验系统主要参数取自文献[15]。忽略换流阀损耗, 即交流侧注入换流站有功功率 P_i 等于注入直流线路功率 P_{dc1} 。正常运行时, 换流站

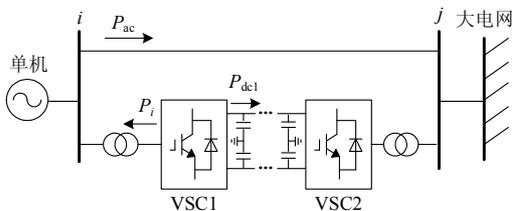


图 1 基于 VSC-HVDC 的交直流混联试验系统
Fig. 1 AC-DC hybrid test system based on VSC-HVDC

VSC1 采用定有功功率、定无功功率控制, 换流站 VSC2 采用定直流电压、定无功功率控制。

图 2 是基于有功功率注入的 VSC-HVDC 直流线路模型, 直流功率波动会引起直流电压波动, 它们之间数学关系可由下述状态方程表示。

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} V_{di} = \frac{1}{C_{dc}} \left(\frac{-P_i}{V_{di}} - I_d \right) \\ \frac{d}{dt} V_{dj} = \frac{1}{C_{dc}} \left(\frac{-P_j}{U_{dj}} + I_d \right) \\ \frac{d}{dt} I_d = \frac{1}{L_{dc}} (-I_d R_{dc} + V_{di} - V_{dj}) \end{cases} \quad (1)$$

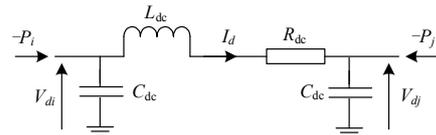


图 2 基于有功功率注入的 VSC-HVDC 直流线路模型
Fig. 2 HVDC line model for VSC-HVDC based on active power injection

1.2 VSC-HVDC 的控制系统

VSC-HVDC 两端换流站的控制系统结构对称, 各自独立控制。如图 3 所示, VSC 站级控制采用 dq 坐标系下外环功率内环电流控制结构。外环控制器根据有功功率, 无功功率以及直流电压等参考值, 计算内环电流参考值; 内环电流控制器的作用是使 I_{sd} 和 I_{sq} 跟踪其参考值。

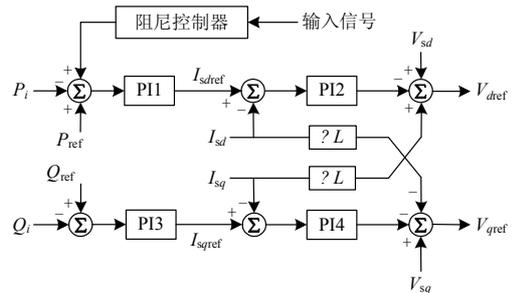


图 3 附加阻尼控制的 VSC 控制器
Fig. 3 VSC controller with additional damping control

图 3 中, 外环功率控制器采用 PI 控制, 能够消除稳态功率误差。为了抑制交流系统低频振荡, 在有功功率控制器中附加阻尼控制器, 进行直流功率调制。

1.3 VSC-HVDC 的过负荷能力

实际工程设计时需要 VSC-HVDC 的过负荷能力做出规定, 即明确直流电流的过负荷额定值及其持续时间。对 VSC-HVDC 过负荷能力的要求主

要取决于所接入交流系统的需要。例如，当受端交流系统发生故障或交流系统发生低频振荡时，可能需要在短时间内向受端交流系统注入大量有功功率或无功功率用以维持交流系统稳定性，这需要 VSC-HVDC 输电系统具有一定的过负荷能力。而 VSC-HVDC 过负荷能力主要受冷却设备的效率以及运行环境温度的影响。

根据过负荷时间的长短，VSC-HVDC 的过负荷能力可分为：连续过负荷，短期过负荷，暂时过负荷。其中，暂时过负荷是指在数秒钟内直流功率高于其额定值的能力，其主要作用在于提高交流系统暂态稳定性或阻尼交流系统低频振荡。但是这种过负荷能力是有限的，并且对冷却设备提出了更高的要求。

2 引入故障恢复信号的附加阻尼控制设计

2.1 附加阻尼控制器设计

在 VSC-HVDC 交直流混联系统中，令 VSC 输出有功功率参考值 P_{ref} 与交流线路有功功率 P_{ac} 间的开环传递函数以及附加阻尼控制的传递函数分别为 $G(s)$ 和 $H(s)$ 。由 $G(s)$ 和 $H(s)$ 构成的闭环系统如图 4 所示。

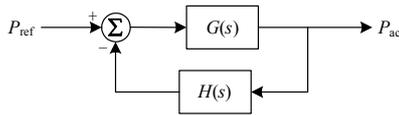


图 4 P_{ref} 与 P_{ac} 间的闭环系统

Fig. 4 Closed-loop control system from P_{ref} to P_{ac}

利用 Prony 辨识方法结合极点配置法得到 VSC-HVDC 附加阻尼控制器，如图 5 点划线上部所示，详细过程请参见文献[13]，此处不再赘述。

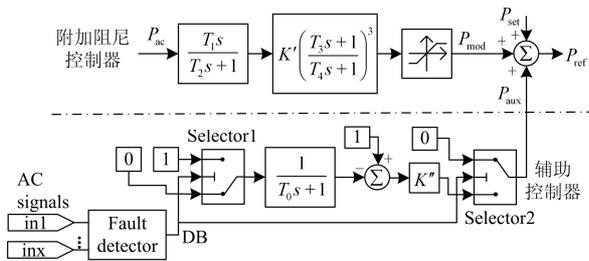


图 5 引入故障恢复信号的附加阻尼控制器

Fig. 5 Additional damping controller using with fault recovery signal

2.2 引入故障恢复信号的附加阻尼控制器设计

一般 VSC-HVDC 允许的过负荷为 1.1 p.u.。为了防止换流阀出现严重过载或直流电压大幅波动，必须限制附加阻尼控制输出信号的幅值。但是，由

于限幅环节的作用，直流功率调制只能在上下限值之间振荡衰减，而不是理想的自由振荡衰减，衰减速度相对变慢，即降低了系统阻尼。

针对上述情况，在原有有功功率设定值 P_{set} 和附加阻尼信号 P_{mod} 的基础上，叠加一个故障恢复信号 P_{aux} 。故障恢复信号实际为一指数规律衰减信号，可使 VSC-HVDC 在故障前期阶段减小有功功率幅值，为附加阻尼控制提供相对充足的调制裕度。为满足上述目标，设计了一个辅助控制器，将其并入附加阻尼控制器中，构成引入故障恢复信号的附加阻尼控制器，如图 5 所示。辅助控制器由下述三个部分组成。

- 1) 故障检测器：用于检测系统故障特征信号，例如 VSC 所连交流母线的电压幅值 V_{ac} 或直流功率的变化率 dP_{dc}/dt ，若超出限值，发出解锁指令 DB；
- 2) 故障恢复信号合成器：用于合成故障恢复信号 P_{aux} ，即 $P_{aux} = -K''e^{-t/T_0}$ ；
- 3) 输出信号选择器：根据解锁指令 DB，选择输出故障恢复信号或输出 0。

2.3 故障恢复信号参数整定

不考虑限幅环节，理想的附加阻尼控制器输出信号 P_{mod} 随时间的变化规律为自由振荡衰减，可用式(2)简化表示。

$$P_{mod}(t) = Ke^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta) \quad (2)$$

式中： K 是正比例系数； $\sigma > 0$ 是衰减常数； ω 是低频振荡频率； θ 是初相位。需要指出，此处的 σ 、 ω 为系统振荡的主导特征根。

选取 P_{mod} 衰减振荡曲线的包络线作为故障恢复信号，即 $P_{aux} = -K''e^{-\sigma t}$ 。

综上，在额定条件下，VSC 有功功率(直流功率)参考 P_{ref} 变为

$$P_{ref} = P_{set} + P_{mod} + P_{aux} = 1.0 + Ke^{-\sigma t} \sin(\omega t + \theta) + (-K''e^{-\sigma t}) \quad (3)$$

由于直流功率波动会引起直流电压波动，因此， P_{ref} 最大波动 ΔP_{ref} 绝对值(取 P_{ref} 第一个周波的峰峰值)不超过与最大允许直流电压波动对应的最大直流功率波动 $\Delta P_{dc,max}$ 绝对值的 2 倍。即

$$|\Delta P_{ref}(K'')| \leq 2|\Delta P_{dc,max}| \quad (4)$$

根据式(4)，可以求出 K'' 的最大值 K''_{max} 。最后参数 K'' 的选择应满足

$$K'' = \begin{cases} K & 0 < K \leq K''_{max} \\ K''_{max} & K \geq K''_{max} \end{cases} \quad (5)$$

2.4 有无故障恢复信号的直流功率调制比较

VSC 系统有功功率和无功率的快速控制可

提高电网受到扰动时的动态性能。来自环流器的短路容量是可控的, 即控制直流系统输出或输入电流的大小来控制直流功率^[16]。因此, 减小直流传输功率对 VSC-HVDC 系统具有可行性。

对比图 6 (a)和图 6(b), 可以更直观地解释本文提出的方法所要达到的控制效果。只在附加阻尼控制器作用下, 直流功率调制波形出现了 0.1 p.u.短时过负荷, 且由于限幅环节, 直流调制功率只能在上下限值之间振荡, 而不是理想的自由振荡。引入故障恢复信号的附加阻尼控制实质上改造了直流功率调制的包络线, 使得对应的直流功率调制曲线不超出额定直流功率 1.0 p.u.(上限边界), 可以自由衰减振荡。若考虑到直流功率的短时过负荷能力, 允许直流功率短时越限 10%, 直流功率调制曲线可变为图 6(c)所示曲线, 减小故障恢复信号给交流线路带来的压力。

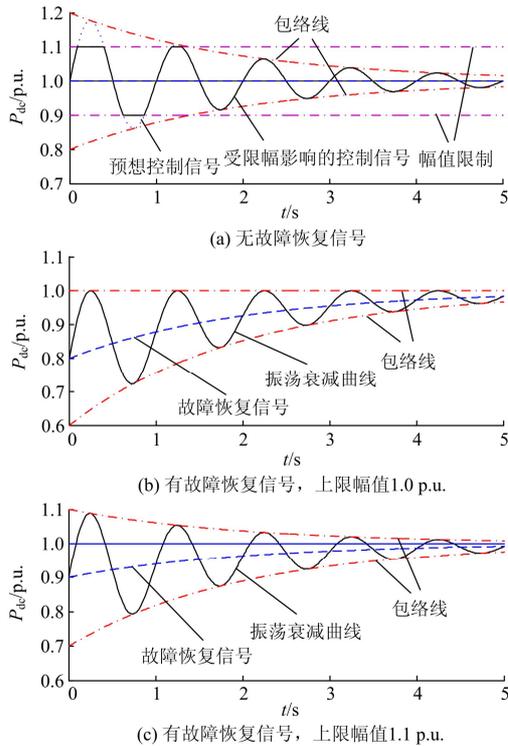


图 6 有无故障恢复信号的直流功率调制示意图

Fig. 6 Diagrams of DC power modulation with or without the use of fault recovery signal

3 直流功率波动与直流电压波动的关系

为了确定上节所述的最大允许直流功率波动值, 通过对多组仿真试验数据采用折线法得到直流功率波动和直流电压波动之间的关系曲线。获得试验数据的简单方法是给直流功率参考值 P_{ref} 施加不同大小的正弦波动量 ΔP_{dc} , 仿真得出直流电压波动

量 ΔV_{dc} 。绘出它们之间的关系曲线如图 7 所示。

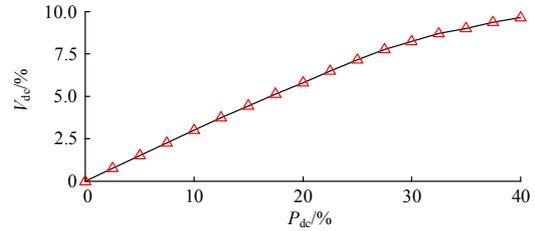


图 7 直流功率波动 ΔP_{dc} 与直流电压波动 ΔV_{dc} 的关系曲线

Fig. 7 Relationship curve of DC power ripple ΔP_{dc} and DC voltage ripple ΔV_{dc}

根据图 7 数据可以看出, 开始阶段 ΔV_{dc} 随 ΔP_{dc} 的变化呈线性关系; ΔP_{dc} 接近 30% 以后, 呈非线性变化, 这是由于直流功率的波动超出限值, 导致限幅后的直流电压波动范围相应减小。由最大允许直流电压波动 $\pm 5\%$ ^[17], 得到 $\Delta P_{dc,max}$ 约为 $\pm 17\%$ 。

4 仿真分析

本文利用 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了图 1 所示的交直流混联试验系统。

依据极点配置法设计附加阻尼控制器的参数, 选择特征根 $-0.20 \pm j6.60$, 对应的阻尼比为 3.13%, 振荡频率为 1.05 Hz。由此特征值设计的控制器参数为: $T_1=10$, $T_2=10$, $T_3=0.55$, $T_4=0.2$, $K'=0.25$ 。本文针对选定的主导振荡模式, 依据上述直流功率波动允许的最大范围, 代入式(4)确定 K''_{max} , 并取 $K''=K''_{max}=0.22$ 。依据选择的目标特征根进行计算, 近似选取 $T_0=5$ 。

$t=0$ s 时 VSC-HVDC 投入运行, 稳态直流功率在额定功率 1.0 p.u. 下; $t=5$ s 时在母线 i 发生瞬时三相短路故障, 持续 0.1 s, 引起功率振荡, 分别对无附加阻尼控制、附加阻尼控制和本文提出的引入故障恢复信号的附加阻尼控制方式进行仿真。

图 8 分别为无附加阻尼控制器, 附加阻尼控制器, 以及引入故障恢复信号的附加阻尼控制器下的 VSC-HVDC 直流功率调制情况。从图中可以看出, 直流功率实际值能够快速而精确地跟踪其参考值变化, 稳态时直流功率为 1.0 p.u., 交流系统发生故障瞬间, 直流功率瞬间大幅跌落; 只有附加阻尼控制器的情况下, 系统发生功率振荡后, 直流功率幅值达到 1.1 p.u., VSC 短时过载运行, 且受限幅影响, 直流功率调制区间为 0.9~1.1 p.u., 如图 8(b)所示; 采用本文提出的方法, 直流功率幅值未超出上限值 1.1 p.u., 直流功率调制过程为自由振荡衰减, 如图 8(c)所示, 与图 8(b)比较, 振荡幅度在安全范围内得

到扩大，显著减小了限幅环节的影响。

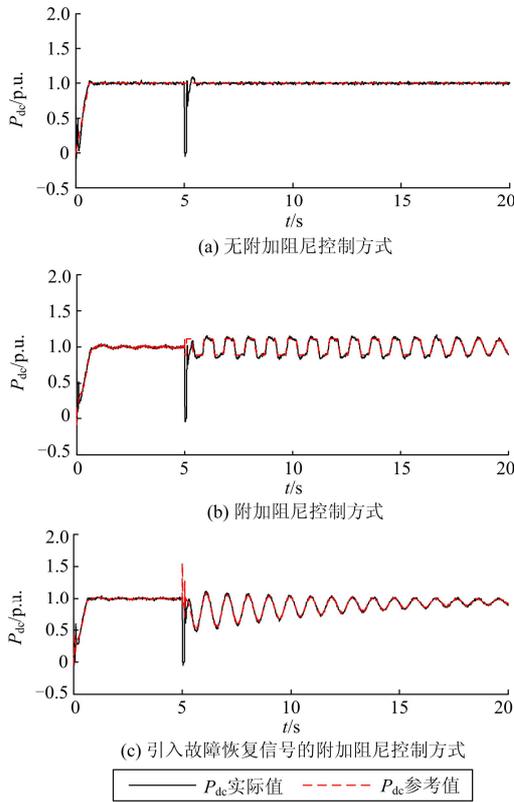


图 8 不同控制方式下的直流功率 P_{dc} 的参考值与实际值
 Fig. 8 Reference value and actual value of P_{dc} in three different control ways

图 9 进一步给出了三种不同控制方式的其他仿真结果。仿真结果表明：VSC-HVDC 附加阻尼控制能够有效抑制交流系统低频振荡，引入故障恢复信号的附加阻尼控制的抑制效果更加显著，如图 9(a) 和图 9(b) 所示，发电机功角或交流联络线有功功率更快地恢复到各自的稳态值；本文控制方法在直流功率调制前期对交流母线 i 节点电压波动和 VSC-HVDC 直流线路电压所产生的影响都在允许范围内，分别如图 9(c) 和图 9(d) 所示。

利用 Matlab/Prony 辨识工具箱对图 9(a) 发电机功角变化曲线进行 Prony 时域辨识。选取 18 阶辨识模型，辨识结果与仿真曲线几乎完全重合，如图 10 所示。表 1~表 3 列出了辨识结果中幅值相对较大的几个分量。

由表 1~表 3 可以得出系统的主导特征根为模式 2。可以看出，采用附加阻尼控制，阻尼比由 0.399665% 提高到 1.481610%，但是未达到预期效果，也就是说附加阻尼控制器的限幅环节作用降低了系统阻尼。而采用本文控制方法，阻尼比提高到 3.1333%，达到了所设定的目标。

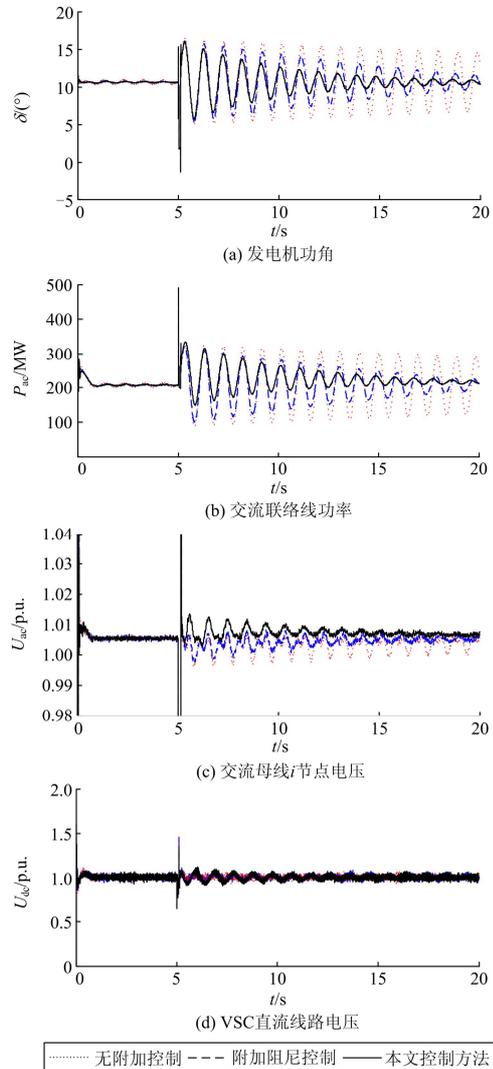
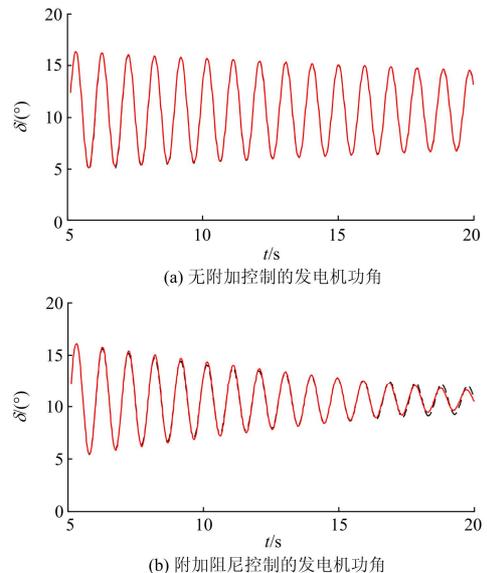


图 9 仿真结果

Fig. 9 Simulation results



(b) 附加阻尼控制的发电机功角

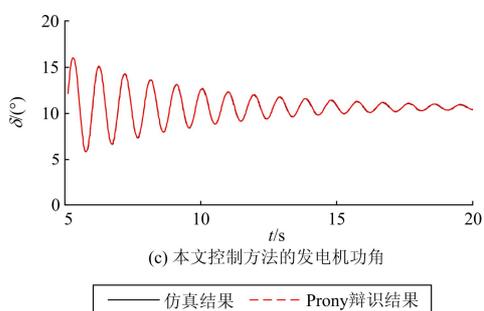


图 10 发电机功角的仿真和 Prony 辨识结果

Fig. 10 Results of generator power angle by simulation and Prony identification

表 1 无附加阻尼控制的 Prony 辨识结果

Table 1 Prony identification results without damping control

模式	幅值/(°)	特征根/p.u.	阻尼比/%	频率/Hz
1	21.425 278	0.000 211 7	—	—
2	5.679 167 7	-0.025 9+j6.479 2	0.399 665	1.031 196
3	0.029 061 3	-0.120 6+j26.081 6	0.462 243	4.151 02
4	0.018 349	-0.159 9+j13.117 7	1.218 893	2.087 74
5	0.011 786	-1.960 5+j40.750 3	4.805 394	6.485 614
6	0.018 917	-2.010 1+j47.419 6	4.235 232	7.547 068

表 2 有附加阻尼控制的 Prony 辨识结果

Table 2 Prony identification results with damping control

模式	幅值/(°)	特征根/p.u.	阻尼比/%	频率/Hz
1	21.425 278	0.000 102 02	—	—
2	5.679 167 7	-0.096 7+j6.526 4	1.481 610	1.038 706
3	0.029 061 3	-0.382 2+j95.482 9	0.400 254	15.196 58
4	0.018 349	-0.508 1+j108.728 7	0.467 308	17.304 71
5	0.011 786	-1.385 7+j20.675 2	6.687 285	3.290 553
6	0.018 917	-2.343 3+j36.458 2	6.414 176	5.802 505

表 3 本文控制方法的 Prony 辨识结果

Table 3 Prony identification results with proposed damping control

模式	幅值/(°)	特征根/p.u.	阻尼比/%	频率/Hz
1	21.425 278	0.000 340 53	—	—
2	5.679 167 7	-0.207 7+j6.624 2	3.133 300	1.054 282
3	0.029 061 3	-0.700 6+j95.352 9	0.734 714	15.175 88
4	0.018 349	-0.905 8+j108.795 5	0.832 520	17.315 34
5	0.011 786	-3.316 3+j52.375 1	6.319 081	8.335 76
6	0.018 917	-3.516 2+j66.419 1	5.286 544	10.570 93

5 结论

本文讨论了 VSC-HVDC 附加阻尼控制器中限幅环节对直流功率调制效果的影响。针对此问题,提出了引入故障恢复信号的附加阻尼控制,将附加

阻尼控制器输出信号叠加指数衰减的故障恢复信号,作为直流功率调制参考值。该控制方法在直流功率调制前期,减小了直流功率幅值,并在直流电压波动的允许范围内,使直流功率调制过程为理想的自由振荡衰减,从而减小限幅环节的影响,间接地增强了系统阻尼,使系统可以更快地恢复到稳定运行状态。对比有无故障恢复信号的附加阻尼控制的仿真结果,验证了本文提出的控制方法能够显著减小限幅环节的影响,达到直流功率调制的预期目标,提高了交流系统的稳定性。

参考文献

- [1] 李建设, 陈磊, 陈亦平, 等. 基于振荡能量消耗的 HVDC 和 SVC 附加阻尼控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 9-15.
- LI Jianshe, CHEN Lei, CHEN Yiping, et al. Supplementary damping control of HVDC and SVC based on oscillation energy dissipation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 9-15.
- [2] 魏晓云, 孙辉, 徐凤阁, 等. 矢量电流控制的电压源换流器式高压直流输电系统动态特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(6): 34-40.
- WEI Xiaoyun, SUN Hui, XU Fengge, et al. Dynamic performance analysis of vector current controllers for VSC-HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(6): 34-40.
- [3] 汤广福, 贺之渊, 滕乐天, 等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术, 2008, 32(22): 39-45.
- TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-45.
- [4] 姚伟, 文劲宇, 程时杰, 等. 考虑时滞影响的 SVC 广域附加阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2012, 27(3): 239-246.
- YAO Wei, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Design of wide-area supplementary damping controller of SVC considering time delays[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(3): 239-246.
- [5] MITHULARMNTHAN N, CANIZARES C A, REEVE I, et al. Comparison of PSS, SVC, and STATCOM controllers for damping power system oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 786-792.
- [6] SHOJAEIAN S, SOLTANI J, MARKADEH G A. Damping of low frequency oscillations of multi-machine multi-

upfc power systems, based on adaptive input-output feedback linearization control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1831-1840.

[7] YOUSEF P, BALARKO C, TIM C G. Control coordination within a VSC HVDC link for power oscillation damping: a robust decentralized approach using homotopy[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2013, 21(4): 270-1279.

[8] 胡昊明, 郑伟, 徐伟, 等. Prony 和 HHT 算法在低频振荡在线辨识中的适用性比较[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 33-40.

HU Haoming, ZHENG Wei, XU Wei, et al. Comparison of the applicability of Prony and HHT algorithms for on-line identification of low-frequency oscillation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 33-40.

[9] 谭谨, 王晓茹, 李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(3): 15-23.

TAN Jin, WANG Xiaoru, LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 15-23.

[10] PREECE R, MILANOVIC J V. Tuning of a damping controller for multiterminal VSC-HVDC grids using the probabilistic collocation method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 318-326.

[11] 赵睿, 李兴源, 刘天琪, 等. 抑制次同步和低频振荡的多通道直流附加阻尼控制器设计[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 89-93.

ZHAO Rui, LI Xingyuan, LIU Tianqi, et al. Design of multi-channel DC supplementary damping controller for subsynchronous and low-frequency oscillation suppression[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3): 89-93.

[12] 郑超, 周孝信. 基于普罗尼辨识的 VSC-HVDC 附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 25-30.

ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Design of additional damping controller for VSC based HVDC transmission system by use of prony identification method[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 25-30.

[13] 郑超, 周孝信. 基于电压源换流器的高压直流输电小信号动态建模及其阻尼控制器设计[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 7-12.

ZHENG Chao, ZHOU Xiaoxin. Small signal dynamic modelling and damping controller designing for VSC based HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 7-12.

[14] 荆勇, 杨晋柏, 李柏青, 等. 直流调制改善交直流混联系统暂态稳定性的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(10): 1-4.

JING Yong, YANG Jinbai, LI Baiqing, et al. Research on improving transient stability of AC/DC hybrid system by HVDC modulation[J]. Power System Technology, 2004, 28(10): 1-4.

[15] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994.

[16] GB/T 30553-2014, 基于电压源换流器的高压直流输电[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.

[17] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2015-01-22; 修回日期: 2015-02-10

作者简介:

王振浩(1964-), 男, 教授, 长期从事电力系统自动化科技研发及教学工作; E-mail: zhenhaowang@126.com

李洋(1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定与控制; E-mail: liyang@nedu.edu.cn

高凯(1972-), 男, 硕士, 高工, 长期从事电力系统调度自动化研究。

(编辑 周金梅)