

# 基于综合性能指标的交直流混合系统直流调制研究

吴华坚, 王渝红, 李兴源, 魏巍

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 通常的直流调制研究, 只考虑其对系统功率振荡阻尼的改善。直流调制改变系统功率振荡阻尼同时, 对频率特性和功角特性也会有影响。把频率偏差连同功角和功率偏差一起作为综合性能指标, 在直流调制研究时, 对功率响应进行 Prony 分析, 选灵敏度最高的备选交流线路作为调制信号。以综合性能指标作为衡量标准, 用分层寻优方法对反馈增益进行优化; 并与未考虑频率偏差的指标作为标准的优化增益进行比较, 结果表明前者对频率稳定更为有利。最后以四川电网为例, 验证了提出方法的有效性。

**关键词:** 交直流混合系统; 直流调制; 综合性能指标; 低频振荡; 频率稳定

## Study on DC modulation for AC/DC hybrid transmission system based on comprehensive performance index

WU Hua-jian, WANG Yu-hong, LI Xing-yuan, WEI Wei

(School of Electrical and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In the usual researching of DCM (DC Modulation), the improvement of system damping of power oscillation is only considered. The DCM can improve the system damping ratio of power oscillation, and meanwhile it will affect swing-angle stability and frequency stability. So the frequency deviation is added in comprehensive performance index with swing-angle deviation and power deviation. In the studying of the DCM in the AC/DC hybrid transmission system, the most sensitive AC circuit signal is chosen to be the modulation signal by Prony analysing, and the comprehensive performance index is used to be the index to optimize the feedback gain based on hierarchical search. The gain got by using the comprehensive performance index is compared with the one got by using the index that does not consider frequency deviation, it's proved that the frequency stability of the former is better. Finally, Sichuan power system is utilized to illustrate the effort of this method mentioned in this paper.

**Key words:** AC/DC hybrid transmission system; DCM; comprehensive performance index; low-frequency oscillation; frequency stability

中图分类号: TM72 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)22-0068-06

## 0 引言

我国资源分布和地区经济发展的不均衡, 决定了“西电东送、南北互供、全国联网”的电力发展格局。远距离、大容量、高电压等级的联合电网的建设, 在缓解电力能源供需不平衡矛盾的同时, 也引起了低频振荡等一系列的系统稳定问题。

将于 2009 年底建成的德阳—宝鸡±500 kV 直流联网工程可实现四川水电资源和西北火电资源的优势互补, 产生巨大的经济效益和环境效益。四川

电网存在弱阻尼低频振荡<sup>[1]</sup>, 这种振荡对系统稳定存在潜在的威胁。德宝直流建成后, 可以利用直流调制对低频振荡进行控制<sup>[2-13]</sup>。

本文对文献[5-6]所采用指标进行改进, 设计了综合性能指标, 在丰大运行方式下用灵敏度分析法选取了最灵敏的反馈信号, 以综合性能指标为优化标准用分层寻优的方法确定最优反馈增益。并与未加入频率偏差的指标为标准的优化结果进行了比较。最后验证了在丰小方式下的鲁棒性。

## 1 综合性能指标

传统的控制器是简化模型下的孤立控制器, 只选用本地可测信号。这种控制器设计方式在改善本

**基金项目:** “十一五”国家科技支撑计划资助项目 (2008BAA-13B01); 国家电网公司项目; 四川电网公司项目

机性能的同时, 对系统中其他控制器性能的影响具有不确定性, 运行方式或网络结构的变化可能引起系统其他性能的恶化。如 PSS 在增加系统功率振荡阻尼的同时, 可能会减小系统的同步转矩。

协调控制可按二次型性能指标对控制器的动态行为进行协调, 使整个系统的综合性能指标达到最优。

$$\min J = \int_0^{\infty} X^T Q X dt \quad (1)$$

式(1)表示的二次型性能指标中,  $X$  通常为能描述系统运动过程的变量与其对应稳态值之间的偏差量。

以往研究直流调制的文献通常只把交流线路功率偏差  $\Delta P$ <sup>[5]</sup> 作为  $X$ , 以保证系统对区域间振荡有较好的阻尼效果; 文献[6]把发电机功角偏差  $\Delta\delta$  也加入  $X$  作为衡量指标, 若  $Q$  为单位阵, 则式(1)变为:

$$\min J = \int_0^{\infty} (\Delta\delta^T \Delta\delta + \Delta P^T \Delta P) dt \quad (2)$$

系统的阻尼特性和故障后频率振荡有着极为密切的联系, 对系统阻尼进行优化时, 应该考虑优化结果对频率稳定性的影响, 所以本文将  $X$  表示为:

$$X = [\Delta\delta \ \Delta f \ \Delta P]^T \quad (3)$$

则式(1)变为:

$$\begin{aligned} \min J = \int_0^{\infty} (\Delta\delta^T \Delta\delta + \Delta f^T \Delta f + \Delta P^T \Delta P) dt = \\ \int_0^{\infty} (\sum_i \Delta\delta_i^2 + \sum_j \Delta f_j^2 + \sum_k \Delta P_k^2) dt \end{aligned} \quad (4)$$

由于式(4)表征系统综合动态性能, 本文称  $J$  为综合性能指标。下面, 对综合性能指标的具体表达式进行两处改进。

#### (1) 基准值的选择

文献[5-6]以扰动前的稳态值作为偏差量的基准值, 例如功角偏差为

$$\Delta\delta = \delta_{(t)} - \delta_{(0)} \quad (5)$$

式中,  $\delta_{(0)}$  为扰动发生前的功角稳态值。

扰动后系统很可能有新的稳定值, 扰动后系统的变量是围绕新稳态值振荡的, 而非扰动前初值。式(5)的基准值选取只适用于扰动前后平衡点不改变的情况, 不具有普遍性。本文选取扰动后的新稳态值作为基准值, 物理意义更明确。即

$$\Delta\delta = \delta_{(t)} - \delta_{(n)} \quad (6)$$

式中,  $\delta_{(n)}$  为扰动后的功角新稳态值, 取扰动后稳定计算的稳定值。

#### (2) 归一化处理

$\Delta P$  的数量级要比  $\Delta\delta$  和  $\Delta f$  大得多, 很可能出

现信号淹没, 不能准确反映  $\Delta\delta$  和  $\Delta f$  对综合性能指标的贡献。针对这点, 对指标进行归一化, 令

$$\Delta\delta' = \frac{\Delta\delta}{|\Delta\delta|_{\max}} \quad (7)$$

式中,  $|\Delta\delta|_{\max}$  为功角的最大偏差值。

对  $\Delta P$  和  $\Delta f$  也作同样处理。最终式(4)变为:

$$\begin{aligned} \min J = \int_0^{\infty} \left[ \sum_i \left( \frac{\delta_{i(t)} - \delta_{i(n)}}{|\Delta\delta|_{i\max}} \right)^2 + \right. \\ \left. \sum_j \left( \frac{f_{j(t)} - f_{j(n)}}{|\Delta f|_{j\max}} \right)^2 + \sum_k \left( \frac{P_{k(t)} - P_{k(n)}}{|\Delta P|_{k\max}} \right)^2 \right] dt \end{aligned} \quad (8)$$

式(8)所表示的综合性能指标的物理意义如图1所示: 被积函数的三项分别希望的是功角偏差、频率偏差和功率偏差的平方最小。显而易见, 平方项的积分表示图1所示的阴影面积, 而面积越小意味着系统振荡平息较快, 也就说明系统对振荡具有较强的阻尼和较好的动态响应特性。

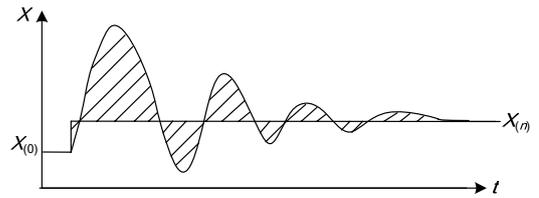


图1 综合性能指标物理意义

Fig.1 Physical meaning of comprehensive performance index

## 2 交直流系统直流调制研究

### 2.1 直流调制介绍

在交直流混合输电系统中, 直流调制是一种抑制低频振荡的有效手段。直流调制是在已有的直流输电控制系统中加入附加直流调制器, 从两端交流系统中提取反映系统异常(如频率、功率、电流等变化)的信号, 来调节直流输电线路的电流或功率, 起到改善系统功率振荡阻尼等性能的作用。其中, 直流大方式调制主要用来提供同步功率, 可以增强交流的暂态稳定性, 而直流小方式调制主要用来增加系统功率振荡阻尼<sup>[3]</sup>。为了综合比较这两种调制方式对系统综合性能的影响, 本文将对两种方式都进行优化比较。

直流小方式调制示意图如图2所示, 大方式调制示意图如图3所示。根据工程经验, 与其他参数相比, 增益  $K$  对调制的效果影响最大, 本文着重对  $K$  进行优化, 而其他参数取工程经验值。

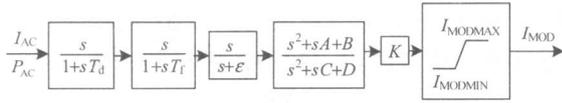


图2 直流小方式调制示意图

Fig.2 DC small mode modulation

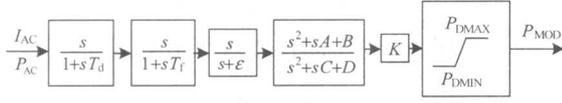


图3 直流大方式调制示意图

Fig.3 DC great mode modulation

2.2 调制信号的选取

直流调制信号可以选为交流系统中任意一条交流线路的电流和功率信号，选择对直流功率改变灵敏度高的信号能充分发挥直流调制的效果。本文用灵敏度分析法选取直流调制信号。此方法的思想为：通过无直流调制时在功率指令处施加瞬时冲击小扰动  $\Delta P_{dc}$ ，求出所有预选线路对此冲击的特定频率灵敏度  $\eta$ ：

$$\eta_{i-f} = \frac{\Delta P_{aci-f}}{\Delta P_{dc}} \quad (9)$$

式中： $\Delta P_{aci-f}$ 为由于直流功率的微小改变  $\Delta P_{dc}$  所引起的第  $i$  条线路功率对应某个频率的振荡幅值。

在四川电网中存在的低频振荡主要是 0.4 Hz 左右的区域低频振荡，所以我们主要分析这个频率对应的振荡幅值。

一个线性动态系统的实测响应序列  $y(n)$ ，Prony 算法可用一组指数函数项的线性组合来表示之<sup>[3,7,9]</sup>，如式 (10) 所示。

$$y(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n = \sum_{i=1}^p A_i e^{j\theta_i} e^{(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t n} \quad (10)$$

式中： $n = 0 \sim N - 1$ ， $N$  为  $y(n)$  的数据个数； $p$  为模型阶数； $A_i$  为模式幅值； $\theta_i$  为模式初相位； $\alpha_i$  为模式衰减因子； $f_i$  为模式频率； $\Delta t$  为时间间隔。

由式 (10) 可得到某一振荡频率  $f_i$  对应的幅值  $A_i$ ，与其对应的阻尼比  $\xi_i$  可由式 (11) 算得。

$$\xi_i = -\ln[z_i] / 2\pi f_i \Delta t \quad (11)$$

因此 Prony 方法可以对响应曲线进行特定频率的幅值和阻尼比进行分析。本文采用 Prony 方法对预选线路有功功率响应进行分析，选取振荡幅值灵敏度较高的交流线路信号作为直流调制信号。

2.3 增益优化

选定调制信号后，分别对两种调制方式的增益  $K$  进行优化。采用分层寻优法对增益进行优化，用

综合性能指标作为衡量指标。

分层寻优的基本思想为：

1) 在寻优边界  $[K_{min}, K_{max}]$  内用较大的步长  $\Delta h$  进行搜索，找到使综合指标  $J$  最小的  $K_i$  以及次小的  $K'_i$ 。

2) 然后用  $[K_i - \Delta h, K_i + \Delta h]$  作为新的寻优边界，使最优值落在一个较上一层寻优更小的范围之内，进行第二次计算，找到新的最优增益  $K_{i+1}$ 。为防止首次步长过大导致最优值在新的寻优范围外，把上次次优边界  $[K'_{best} - \Delta h, K'_{best} + \Delta h]$  作为备用范围，在此范围内找到次最优增益  $K'_{i+1}$ 。若  $K'_{i+1}$  优于  $K_{i+1}$ ，则更换寻优范围；若反之，则不更换。

3) 重复以上操作，直到前后两次的最优增益之差的绝对值  $|K_{i+1} - K_i| < \epsilon$ ，其中  $\epsilon$  表示预设的增益有效位数。

分层寻优法的编程可操作性很强；保证精度的同时大大减少了计算量，较好地解决了单层寻优中精度要求与计算量相矛盾的问题。在同一层内选取备用寻优范围可以防止因步长过大偶尔出现的最优值外落。以综合指标最小为衡量标准，可使系统整体性能得到较好改善。

整体的直流调制步骤如图 4 所示。

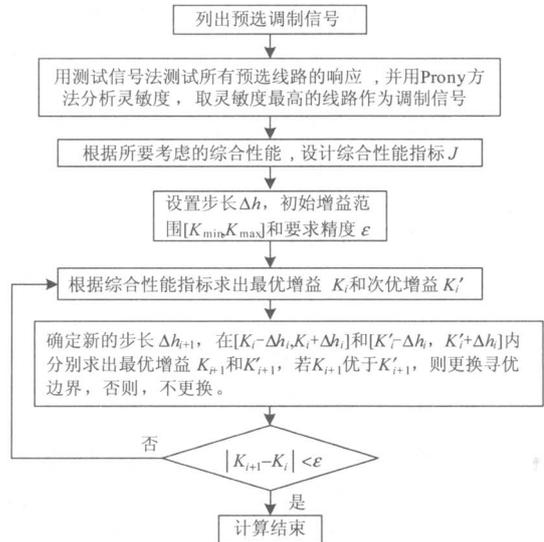


图4 设计流程图

Fig.4 Flow chart of designing

3 四川交直流系统协调控制研究

3.1 四川交直流混合系统介绍

四川交直流混合电网如图 5，截止 2008 年底，四川电网装机容量为 3 460.24 万 kW。德阳—宝鸡 ±500 kV 直流联网工程额定直流电压 ±500 kV，额

定容量 3 000 MW, 计划于 2009 年末建成投产。在四川电网中, 存在有 0.4 Hz 左右的弱阻尼低频振荡问题, 阻尼比为 0.029<sup>[1]</sup>。在四川电网部分机组中加入 PSS 后这个问题仍未得到较好解决。

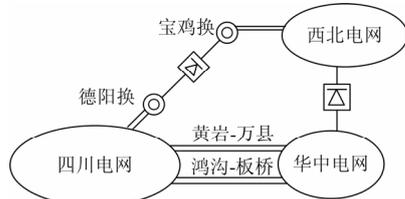


图 5 四川交直流混合电网

Fig.5 Sichuan AC/DC hybrid transmission power network

### 3.2 调制信号的选取

以四川电网 2010 年丰大运行方式作为研究对象, 德宝直流为单极运行, 四川向西北电网送电, 输送容量为 1 500 MW。

选取四川电网中比较重要的 8 条 500 kV 交流线路作为备选信号。选取的依据为: 黄岩-万县、洪沟-板桥是四川电网与外部电网的交流联络线; 谭家湾是离德宝直流最近的 500 kV 重要母线, 与之相连的重要线路有: 谭家湾-南充、谭家湾-绵阳、谭家湾-茂县、谭家湾-龙王; 而尖山是四川电网的薄弱点, 选与之相连的两条重要线路: 尖山-雅安、尖山-东坡。

为了不影响系统稳定运行, 在无直流调制情况下给功率指令施加 10% 即  $\Delta P = 150$  MW 瞬时冲击, 对各交流线路有功功率进行 Prony 辨识, 并按照功率振荡幅值从大到小进行排列, 如表 1 所示。

表 1 各条线路功率振荡曲线的 Prony 辨识结果

Tab.1 Prony analysis of active power curves in different AC lines

线路名称	振荡幅值	振荡频率	灵敏度
黄岩-万县	2.722 7	0.381 3	0.181 5
洪沟-板桥	2.459 7	0.385 2	0.163 9
谭家湾-南充	1.735 1	0.383 6	0.115 7
谭家湾-茂县	1.563 2	0.392 1	0.104 2
谭家湾-绵阳	0.309 7	0.389 1	0.020 6
尖山-雅安	0.283 2	0.386 2	0.018 9
谭家湾-龙王	0.271 6	0.379 3	0.018 1
尖山-东坡	0.069 4	0.383 8	0.004 6

从表 1 的结果可得, 对应 0.4 Hz 左右的频率, 交流线路黄岩-万县的灵敏度最高, 洪沟-板桥次之, 说明对直流系统的运行状态较其他线路更敏感, 其他线路按灵敏度大小依次排列。选灵敏度最高的线路黄岩-万县为直流调制的输入信号。

### 3.3 增益优化

在综合性能指标中,  $\sum_i \Delta \delta_i^2$  选取四川电网中 11 台最具代表性的发电机功角偏差的和: 分别为万和、瀑布沟、小沟头、小关子、自一里、宝珠寺、云谭、宝洲、双河、丰岩堡、攀煤;  $\sum_i \Delta f_i^2$  选取黄岩、洪沟、谭家湾、南充、绵阳、茂县、龙王、尖山、东坡、雅安这十条重要母线频率偏差的和;  $\sum_i \Delta P_i^2$  采用上面预选的八条交流线路的功率偏差的和。

对大小调制方式分别选用电流和功率作为输入信号, 用上一节所述的增益寻优方法进行增益的优化, 增益精度为 0.01, 初始寻优边界为 [1,10], 初始步长为 1, 下一层步长为上层的 1/10。通过寻优, 在表 2 中列出最优的增益, 并计算出最优增益时的综合性能指标。计算无调制时系统的综合性能指标作为比较。

由表 2 可看出, 两种调制方式较无调制时都可使综合性能指标大大减小, 说明系统性能有较大改善。以功率为输入信号要优于以电流为输入信号。其中小方式调制以功率为输入信号, 当增益为 3.06 时综合性能指标最小, 为最佳方案。

为对基于综合性能指标的优化结果进一步验证, 对各方案进行主导特征值和阻尼比分析, 也将结果列于表 2 中。阻尼比越大说明优化结果越好, 阻尼比的大小排序与综合性能指标所示的结果相符。

表 2 两种调制方式效果比较

Tab.2 Comparison of two modulation modes

调制方式	反馈变量	增益 K	综合性能指标 J	主导特征值	阻尼比
无调制	无	无	1.171 9	-0.085 ± 2.476j	0.034
小方式调制	I	3.11	0.521 5	-0.439 ± 2.680j	0.169
	P	3.06	0.500 3	-0.554 ± 2.525j	0.176
大方式调制	I	2.96	0.590 5	-0.418 ± 2.502j	0.162
	P	2.84	0.547 4	-0.418 ± 2.439j	0.165

为对以上理论分析有更直观的了解, 本文进行了数字仿真分析, 仿真软件采用 BPA。除了增益外, 其他参数取工程经验值:  $T_d = T_f = 0.1$ ,  $\varepsilon = 1$ ,  $A = B = C = D = 0$ ,  $I_{\text{MODMIN}} = -0.1$ ,  $I_{\text{MODMAX}} = 0.1$ ,  $P_{\text{DMIN}} = 750$ ,  $P_{\text{DMAX}} = 2\ 250$ 。为模拟小干扰稳定, 在谭家湾-南充 500 kV 线路上设置大电阻接地的小扰动故障, 0.1 s (5 个周波) 后切除故障。

从图 6 曲线可以看出, 加了直流调制后, 四川和外部交流系统的功率振荡得到明显抑制; 从图 7

曲线可以看出, 机组功角摆动情况良好, 地区性振荡有较好的阻尼。各个调制方案的仿真结果与前面的理论分析相一致。

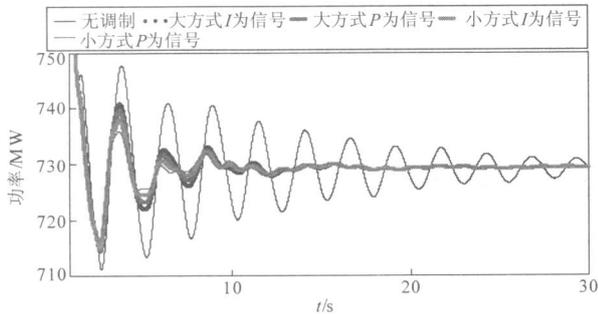


图 6 黄岩-万县功率曲线比较

Fig.6 Comparison of Huangyan-Wanxian power curves

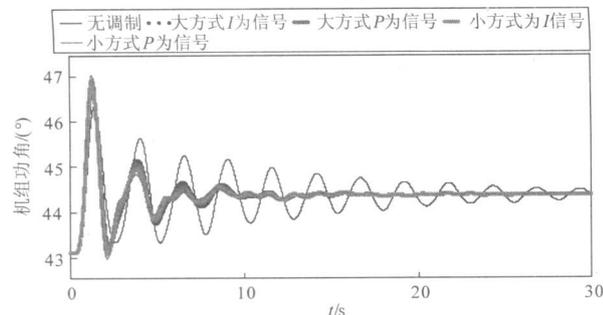


图 7 二滩功角曲线比较

Fig.7 Comparison of Er-tan swing angle curves

### 3.4 频率稳定比较

为比较本文所采用综合性能指标和其他文献所用指标对频率特性影响的不同, 对小方式以功率为调制信号这种调制方案进行优化。

$$\min J = \int_0^{\infty} \left[ \sum_i \left( \frac{\delta_{i(t)} - \delta_{i(n)}}{|\Delta\delta|_{i\max}} \right)^2 + \sum_k \left( \frac{P_{k(t)} - P_{k(n)}}{|\Delta P|_{k\max}} \right)^2 \right] dt \quad (12)$$

文献[5]所用指标如式(12)所示。所选机组功角和线路功率的组合与上一小节相同。初始增益边界和步长, 以及优化方法和前面一致。

优化的结果为:  $K = 3.65$ 、阻尼比  $\zeta = 0.181$ 。

两种优化方案频率的数字仿真比较如图 8 所示。

图 8 中, 曲线 1 是增益为 3.65 时的频率振荡曲线, 曲线 2 是增益为 3.06 时的频率振荡曲线。从图中可看出, 当增益为 3.65 时, 频率在首摆超调量过大, 如此大的频率波动对系统是极为不利的, 而曲线 2 的首摆相对平缓; 而两者的后续摆幅以及稳定时间都相差无几。所以本文的综合性能指标对频率稳定更为有利。虽然本文的指标计算量稍微多于式

(10) 所示指标, 但目前的计算机计算速度完全可以克服这个问题。

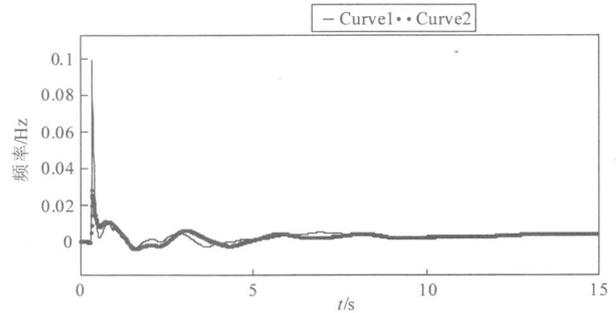


图 8 谭家湾频率曲线比较

Fig.8 Comparison of Tanjiawan frequency curves

$K = 3.65$  时, 阻尼比为 0.181, 较  $K = 3.06$  时的 0.176 有略微提高。而 0.176 的阻尼比对低频振荡的抑制效果已经不错, 阻尼比略微提高却恶化了频率稳定, 这对系统整体性能是不协调的。

### 3.5 鲁棒性验证

为验证所选的调制信号以及优化增益的鲁棒性, 在 2010 年四川电网丰小运行方式下, 德宝直流双极运行, 四川向西北送电 3 000 MW, 进行鲁棒性校验。校验时所设故障与前面相同。

仿真结果如图 9 所示。从结果可以看出, 本文所选的调制信号和优化的增益在丰小方式下也有较好的调制效果, 具有较好的鲁棒性。

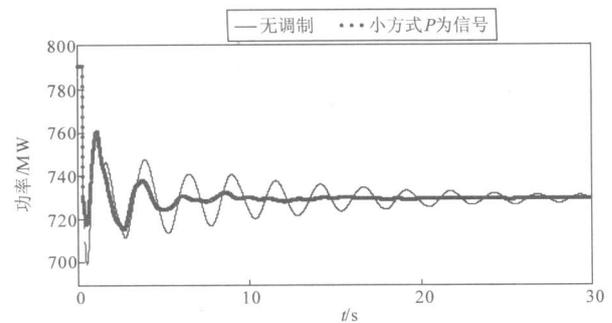


图 9 黄岩-万县功率曲线比较

Fig.9 Comparison of power curves

## 4 结语

本文在以往文献直流调制所用指标的基础上, 考虑阻尼特性对功角稳定和频率稳定的影响, 设计了综合性能指标, 使其物理意义明确, 适于衡量系统的综合性能; 对四川交直流混合系统进行了直流调制的研究。对备选信号的功率冲击响应曲线进行 Prony 分析, 选取了最优调制信号; 采用分层优化法以综合性能指标最小为标准优化了增益; 并与未加入频率偏差的指标为标准的优化结果进行了数字

仿真比较, 证明本文所设计的综合性能指标对增益的优化结果能很好地增加系统功率振荡阻尼, 最为重要的是, 对频率稳定更有益处。

### 参考文献

- [1] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32(17): 78-83.  
DENG Ji-xiang, HE Jian-ming, YAO tian-liang, et al. Analysis of low frequency oscillation for Sichuan power grid in large scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2008, 32(17): 78-83.
- [2] 李兴源. 高压直流输电系统的运行和控制[M]. 北京: 科学出版社, 1994.
- [3] 刘红超, 李兴源. 基于Prony辨识的交直流并联输电系统直流阻尼控制的研究[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(7): 54-57.  
LIU Hong-chao, LI Xing-yuan. Study on damping control for HVDC/AC transmission systems based on Prony analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(7): 54-57.
- [4] 刘红超, 李兴源, 王路, 等. 多馈入直流输电系统中直流调制的协调优化[J]. 电网技术, 2004, 28(1): 5-9.  
LIU Hong-chao, LI Xing-yuan, WANG Lu, et al. Coordination and optimization of HVDC modulations in multi-infeed HVDC transmission systems[J]. Power System Technology, 2004, 28(1): 5-9.
- [5] 毛晓明, 张尧, 管霖, 等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 55-59.  
MAO Xiao-ming, ZHANG Yao, GUAN Lin, et al. Research on coordinated control strategy for inter-area oscillations in China southern AC/DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 55-59.
- [6] 金丽成, 刘海峰, 徐政. 多馈入直流输电系统小信号调制器的协调优化整定[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(16): 10-15.  
JIN Li-cheng, LIU Hai-feng, XU Zheng. Coordination and optimization of small signal modulations in multi-feed HVDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(16): 10-15.
- [7] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于Prony方法的电力系统振荡模式分析及PSS参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-35.  
LU Jing-jing, GUO Jian, TIAN Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-35.
- [8] 颜泉, 李兴源, 王路, 等. 基于PMU的多馈入交直流系统的分散协调控制尼控制的研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 26-30.  
YAN Quan, LI Xing-yuan, WANG Lu, et al. Decentralized coordinating control of multi-infeed AC/DC power system based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 26-30.
- [9] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于Prony方法的大型互联电网PSS参数优化设计[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 7-12.  
GUAN Xiu-peng, CHENG Lin, SUN Yuan-zhang, et al. PSS parameter optimization on large-scale interconnection power grid based on prony method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 7-12.
- [10] IEEE Committee Report. HVDC controls for system dynamic performance[J]. IEEE Trans on PWRs, 1991, 6(2): 743-752.
- [11] 颜泉, 李兴源, 刘红超, 等. 多馈入交直流系统关联测量分散协调控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(12): 42-46.  
YAN Quan, LI Xing-yuan, LIU Hong-chao, et al. Decentralized coordinated control for multi-infeed HVDC based on correlative measured vectors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(12): 42-46.
- [12] Geromel J C, Bernussou J B. Optimal decentralized control of dynamic systems[J]. Automatica, 1982, 18(1): 103-108.
- [13] 陈淮金. 直流调制对交直流混合系统稳定性影响的研究[J]. 中国电机工程学报, 1994, 18(9): 11-17.  
CHEN Huai-jin. Affect of DC modulation control on the stability of AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 18(9): 11-17.

收稿日期: 2009-11-23; 修回日期: 2009-12-30

作者简介:

吴华坚(1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统稳定与控制、高压直流输电的研究工作; E-mail: moyan19861023@163.com

王渝红(1970-), 女, 博士, 高级工程师, IEEE会员, 研究方向为电力系统稳定与控制, 高压直流输电的稳定与控制;

李兴源(1945-), 男, 教授, 博士生导师, IEEE高级会员, 中国电机工程学会理事, 主要从事电力系统分析、稳定和控制、高压直流输电、智能电网的研究。