

提高电力系统小扰动稳定性的 最优分岔控制策略

顾 伟, 蒋 平, 唐国庆

(东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096)

摘要: 结合小扰动参数稳定域的概念, 建议把小扰动稳定控制描述为“保证系统不可控分岔参数 $\mu \geq \mu^{\text{ref}}$, 在系统小扰动参数稳定域内寻找最优的可控参数组合以保证系统的控制代价最小”这一最优分岔控制问题; 建立了最优鞍结分岔控制和最优 Hopf 分岔控制的数学模型, 考虑了各种不等式约束, 从数学上严格保证了电力系统安全性和经济性的最优控制。在 New England 39 节点系统中研究了一个小扰动最优鞍结分岔控制算例, 实现了以励磁参考电压为控制变量的最优分岔控制策略; 提出了初值预测和控制变量选择方案, 实现了大系统中的最优 Hopf 分岔控制策略。优化控制结果表明, 所提出的控制策略可以有效解决小扰动稳定控制问题。

关键词: 最优分岔控制; 小扰动参数稳定域; 单调失稳; 振荡失稳

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0029-05

现代电力系统要维持一个较好的运行方式需要满足 2 个条件:

a. 正常运行时需要保证良好的输电、供电质量, 如保持较好的电压水平等;

b. 需要保证可以承受一定的扰动, 即具有一定的稳定裕度。

目前, 各种有关电力系统的优化问题, 如无功优化、最优潮流等原来只考虑条件 **a** 的优化问题, 也开始在优化目标或优化约束中计及条件 **b** 的作用^[1-2]。

基于对电力系统小扰动参数稳定域 Ω_{SSR} 和分岔控制的研究, 在此提出了最优分岔控制的概念, 用

来描述稳定控制中的这类以分岔值为稳定指标的参数优化问题, 澄清了描述该类问题时的概念混乱; 建立了最优鞍结分岔控制和最优 Hopf 分岔控制的数学模型, 考虑了各种参数控制极限的约束, 从数学上严格保证了电力系统安全性和经济性的最优控制。最后, 采用序列二次规划(SQP)法解决该最优化问题, 以确定电力系统小扰动稳定的最优控制策略。

1 小扰动稳定控制

一般认为小扰动稳定控制包括 2 个部分: 一是保证系统电压稳定性控制行为^[1-4]; 二是保证系统功角稳定性控制行为^[5-6]。

收稿日期: 2007-04-25

对于小扰动稳定控制已进行了大量研究,目前的研究主要有 3 个瓶颈。

a. 小扰动失稳机理的认识。需要对电压失稳还是功角失稳进行区分^[7-8],对振荡失稳还是单调失稳也要区分^[9]。

b. 稳定指标的定义。这决定着能否建立一个有效的优化模型。

c. 缺乏快速准确的优化算法。如前文所述,对于这样一个大规模约束非线性规划问题,无论采用数学优化方法还是现代启发式方法进行求解,都有其局限性。

2 小扰动参数稳定域和分岔控制

2.1 小扰动参数稳定域概念的提出为小扰动稳定提供了控制依据

Venkatasubramanian 等首先提出了 Typal Regions 的概念^[10],这是参数空间的域,当系统在参数空间变化时,与之对应的状态空间改变但保持拓扑等价,直到遇到分岔界面。Typal Regions 的边界由局部分岔以及全局分岔组成,由于全局分岔在广义上是在开的参数空间上稠密的,这导致 Typal Regions 的求解十分困难。因此,Venkatasubramanian 等又在此基础上提出了一种更简单实用的参数空间——可行域(feasibility regions),国内也有文献把其称为小扰动稳定域^[11-12],这里采用了小扰动参数稳定域的叫法。图 1(a)给出了用不可控参数 μ 和可控参数 p 在简化二维空间上描述的小扰动参数稳定域。

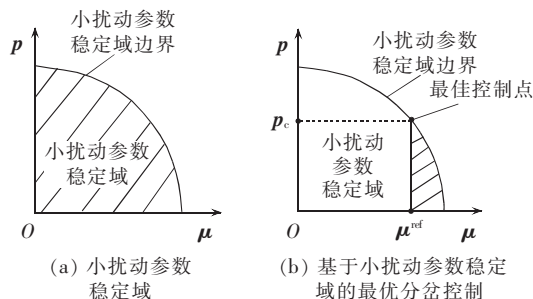


图 1 小扰动参数稳定域和最优分岔控制

Fig.1 Small-signal stability region and optimal bifurcation control

电力系统小扰动参数稳定域是指如下的参数空间:在该区域内的参数下,电力系统在受到小扰动(如负荷的连续变化)偏离其稳定平衡点时,系统具有回到原来的稳定运行点周围的能力^[10]。研究表明,系统可行域空间是由鞍结分岔、Hopf 分岔^[13]、不稳定极限诱导分岔以及奇异诱导分岔这 4 类分岔界面的闭包构成,即 $\Omega_{SSR} = \{B_{SNB} \cup B_{HB} \cup B_{SLIB} \cup B_{SIB}\}$,文中不考虑系统奇异诱导分岔,则小扰动参数稳定域 $\Omega_{SSR} = \{B_{SNB} \cup B_{HB} \cup B_{SLIB}\}$ 。

确定了小扰动参数稳定域的概念,便可以很方便地把状态空间的稳定性问题映射到参数空间中,通过分岔理论研究和定义稳定边界,并且进一步进行参数控制。

2.2 分岔控制概念的提出为小扰动稳定控制提供了控制手段

近十多年来,动力系统分岔的研究在工程系统控制理论中也进行得十分活跃。这主要发生在控制理论的一个新的分枝——分岔控制和混沌控制的领域内^[14]。电力系统分岔控制是指以不可控参数 μ 的分岔值作为评估系统稳定性的指标,所进行的以提高系统稳定性为目的的控制行为。

常用于分析的不可控参数有系统负荷因子,并取分岔点处的负荷因子作为分岔指标(也称为负荷裕度)。文献[5]进一步定义了动态负荷裕度(DLM)和静态负荷裕度(SLM)的概念,它们与本文中的 2 类分岔指标 μ_{SNB} 和 μ_{HB} 是对应的。

电力系统分岔控制的主要目的一般有 2 个:一是消除原有的分岔(如 Hopf 分岔);二是延迟固有的分岔(如鞍结分岔)。

3 最优分岔控制

3.1 最优分岔控制的概念

小扰动参数稳定域 Ω_{SSR} 是包含不可控参数 μ 和可控参数 p 的参数稳定空间。文中结合 Ω_{SSR} 的概念,把小扰动稳定控制描述为保证系统不可控参数大于一个参考值,在系统小扰动参数稳定域 Ω_{SSR} 内寻找最优的可控参数组合以保证系统的控制代价最小。如图 1(b)所示,系统 Ω_{SSR} 边界由各类分岔点的交集组成,因此,保证系统不可控参数 $\mu \geq \mu_{ref}$ 是一个分岔控制问题,而在小扰动参数稳定域内搜索最优可控参数组合是一个最优化问题,故称此问题为电力系统最优分岔控制。

电力系统参数缓慢变化所引起的失稳行为有 2 类:单调失稳和振荡失稳。它们分别可用非线性系统中的鞍结分岔和 Hopf 分岔来标识。电力系统最优分岔控制也因此分为 2 类:最优鞍结分岔控制和最优 Hopf 分岔控制。

本文的研究基于一个假设,即“延迟系统鞍结分岔点或 Hopf 分岔点的控制手段会引起系统控制花费增加或某些稳定指标的恶化”,这个假设与实际电力系统运行特性是相符的。

$$\begin{aligned} \min \quad & C(p) \\ \text{s.t.} \quad & 0 = f(x, y, \mu, p) \\ & 0 = g(x, y, \mu, p) \\ & \text{分岔约束} \\ & \mu \geq \mu_{ref} \\ & h(x, y, \mu, p) \leq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $f(\cdot)$ 为电力系统微分方程; $g(\cdot)$ 为代数方程; $x \in R^n$ 是和发电机、负荷以及其它系统控制器相关的状态变量; $y \in R^m$ 是忽略了快速动态的代数变量; $\mu \in R^l$ 是不可控的参数变量,如负荷因子; $p \in R^k$ 是可控的参数变量,如 AVR 和 SVC 的参考电压等。

需要注意的是, $h(x, y, \mu, p) \leq 0$ 为系统的不等式约束条件, 其中 (x, y) 与 μ, p 之间并不具有一一对应关系, 即 (x, y) 既可以是分岔点处的变量, 也可以是正常运行点处的变量, 从而可以保证正常运行点处的不等式约束。

3.2 实现电力系统最优分岔控制的意义

实际系统控制时, 并不需要最大化系统鞍结分岔点和 Hopf 分岔点。在电力市场环境, 各种控制措施都要考虑价值因素, 即在保证系统稳定裕度的前提下, 最小化控制代价。最大化系统鞍结分岔点或 Hopf 分岔点, 往往也使控制代价最大化, 如对于投切电容器补偿而言, 通常投切越多的电容补偿其鞍结分岔指标就越大。因此, 考虑经济因素, 目前需要解决的问题是, 怎样用最小的控制代价把系统鞍结分岔指标或 Hopf 分岔指标控制在要求水平上。

系统中各种控制器 (AVR、FACTS 等) 参数的调节会改变系统 Hopf 分岔点, 控制器参数的不合理设置不但会影响本控制器的性能, 还会影响整个系统的稳定性, 如过高的励磁放大倍数会引起系统低阻尼。因此从控制器参数优化的角度看, 也同样需要进行最优分岔控制, 以全局优化系统的某些性能指标。

传统的无功优化规划问题的稳定约束只考虑把系统电压控制在允许范围内 (如 $0.95 \sim 1.15$ p.u.), 然而目前随着电力系统规模的扩大以及负荷水平的提高, 无功优化中需要加入确保电压稳定性的稳定约束条件。文献 [1-2, 15] 采用负荷裕度作为电压稳定性指标, 建立了同时保证系统电压水平和电压稳定性的无功优化数学模型, 并采用启发式算法成功解决了此混合规划问题。

但上述研究都是基于潮流模型, 其最大负荷点对应潮流无解点, 并不是真正意义上的鞍结分岔点。现在提出的最优分岔控制数学模型, 以系统 DAE 方程发生鞍结和 Hopf 分岔点时的负荷因子为稳定指标, 采用更精确的模型和指标来研究保证系统远离单调失稳和振荡失稳的经济运行控制策略。

3.3 最优分岔控制策略的实现

3.3.1 最优鞍结分岔控制

用鞍结分岔指标 μ_{SNB} 作为系统稳定指标, 若需要控制其不小于参考值 $\mu_{\text{SNB}}^{\text{ref}}$, 所进行的针对系统可控参数 p 的优化调节可以描述为如下最优鞍结分岔控制问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(p) \\ \text{s.t.} \quad & 0 = f(x, y, \mu_{\text{SNB}}, p) \\ & 0 = g(x, y, \mu_{\text{SNB}}, p) \\ & f_x u_x + f_y u_y = 0 \\ & g_x u_x + g_y u_y = 0 \\ & u_x^T u_x = 1 \\ & \mu_{\text{SNB}} \geq \mu_{\text{SNB}}^{\text{ref}} \\ & h(x, y, \mu_{\text{SNB}}, p) \leq 0 \end{aligned} \quad (2)$$

式 (2) 中的目标函数代表系统的控制代价。

$$C(p) = \sum_{i=1}^N |p_i - p_{0i}| w_i = |p - p_0|^T w \quad (3)$$

w 为控制费用向量, 表示各控制手段的单位控制代价。解此优化问题得到 p , 即为可控参数的最优化结果。

根据文献 [16] 研究所得的控制参数分类结果, 可以参与鞍结分岔控制的参数包括:

- 有功发电调度量;
- 切负荷量;
- 并联电容器补偿组数;
- 发电机二次电压控制 U_{ref} ;
- FACTS 各可控变量, 如 SVC 的控制电压参考值、TCSC 的电抗参考值等;
- AVR 补偿极限, 如 $E_{\text{fd}}^{\text{max}}$;
- FACTS 补偿极限, 如 SVC 的静态补偿容量。

3.3.2 最优 Hopf 分岔控制

用 Hopf 分岔指标 μ_{HB} 作为系统稳定指标, 若需要控制其不小于参考值 $\mu_{\text{HB}}^{\text{ref}}$, 所进行的针对系统可控参数 p 的优化调节可以描述为如下最优 Hopf 分岔控制问题:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(p) \\ \text{s.t.} \quad & 0 = f(x, y, \mu_{\text{HB}}, p) \\ & 0 = g(x, y, \mu_{\text{HB}}, p) \\ & f_x u_{\text{rR}} + f_y u_{\text{rI}} + \beta u_{\text{xl}} = 0 \\ & f_x u_{\text{xl}} + f_y u_{\text{yl}} - \beta u_{\text{rR}} = 0 \\ & g_x u_{\text{rR}} + g_y u_{\text{rI}} = 0 \\ & g_x u_{\text{xl}} + g_y u_{\text{yl}} = 0 \\ & u_{\text{rR}}^T u_{\text{rR}} - u_{\text{xl}}^T u_{\text{xl}} - 1 = 0 \\ & u_{\text{rR}}^T u_{\text{xl}} + u_{\text{xl}}^T u_{\text{rR}} = 0 \\ & \mu_{\text{HB}} \geq \mu_{\text{HB}}^{\text{ref}} \\ & h(x, y, \mu_{\text{HB}}, p) \leq 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 中的目标函数 $C(p)$ 表达式与式 (3) 相同。采用优化算法求得 p , 即为此最优 Hopf 分岔控制结果。需要注意的是, 需要控制的 μ_{HB} 对应系统第 1 个不稳定型 Hopf 分岔点 FUHB (First Unstable Hopf Bifurcation); 而上述优化表达式中, 无法区分 FUHB 和其它不稳定型 Hopf 分岔 (UHB) 以及稳定型 Hopf 分岔 (SHB), 如误把系统 SHB 当作 UHB 进行控制, 会得到错误的控制结果。因此, 控制前需要通过连续法进行分岔分析, 区分这 3 类 Hopf 分岔。

Hopf 分岔控制的参数包括 [16]:

- 有功发电调度量;
- 切负荷量;
- 并联电容器补偿组数;
- 发电机二次电压控制 U_{ref} ;
- FACTS 各可控变量, 如 SVC 的控制电压参考值、TCSC 的电抗参考值等;
- AVR 控制器增益;
- FACTS 控制器增益。

4 算例分析

文中选取参考文献 [16-17] 中 New England 10 机 39 节点系统为研究对象, 系统频率为 50 Hz。

4.1 小扰动最优鞍结分岔控制

通过连续法和最优化方法计算得出该系统的鞍结分岔点为 $\mu_{\text{SNB}}=0.1968$, 现在需要设法把系统的鞍结分岔点延迟, 使 $\mu_{\text{SNB}}^c=0.35$ 。使用分岔控制虽可提高系统静态负荷裕度, 但过量的控制会引起系统控制花费增加, 还有可能使得电网电压越限(通常偏高), 因此在控制的不等式约束中需要加入控制后系统的常规运行电压上、下限约束。

控制信息设置: 选取所有机组的励磁参考电压 $[U_{\text{ref}}^1, U_{\text{ref}}^2, \dots, U_{\text{ref}}^{10}]$ 为控制变量; 目标函数为 $C(U_{\text{ref}}) = |U_{\text{ref}}^{\text{con}} - U_{\text{ref}}^0|^T w_{U_{\text{ref}}}$, 不等式约束包括 $0.95 \leq U_i \leq 1.15, 0.35 \leq \mu_{\text{SNB}}$, 采用序列二次规划法(SQP)进行优化计算。其中控制费用 $w_{U_{\text{ref}}} = [10, 10, 10]$ 。最优鞍结分岔控制结果: SQP 法计算迭代 64 次收敛, 控制结果 $\mu_{\text{SNB}}=0.35$, 控制花费为 $C(U_{\text{ref}})=2.8563(\text{p.u.})$ 。

如表 1 所示, 最优分岔控制结果表明, 只需要调节节点 31、32、33、36、38 上的 5 台发电机的励磁电压参考值为上述优化结果, 就可以达到用最小的控制代价实现 $\mu_{\text{SNB}}=0.35$ 的控制目标。

表 1 New England 39 节点系统小扰动最优鞍结分岔控制前后励磁参考电压对比

Tab.1 AVR reference voltages before and after OSNBS of New England 39-bus test system

母线标号	$U_{\text{ref}}/\text{p.u.}$	
	优化前	优化后
30	1.2847	1.2847
31	1.3720	1.4033
32	1.4040	1.5407
33	1.4121	1.4383
34	1.1110	1.1110
35	1.4866	1.4866
36	1.1144	1.1145
37	1.3924	1.3924
38	1.4452	1.5363
39	1.0564	1.0564

4.2 小扰动最优 Hopf 分岔控制

小扰动分析表明 New England 系统具有 12 个振荡模式, 其中低频振荡模式 9 个。通过连续法和最优化方法计算得出该系统的 FUHB 点为 $\mu_{\text{HFB}}=0.06$, 现在需要设法把系统的 FUHB 点延迟, 使 $\mu_{\text{HFB}}^c=0.16$ 。

由式(4)可知, 最优 Hopf 分岔控制的规模远高于最优鞍结分岔控制, 求解此多参数最优化问题存在一定的数值困难。在这里采取了 2 个方案来保证该问题解的易求性: 一是采用连续法预测分岔点处解的初值; 二是选取强相关量作为控制变量, 减少优化参数。

分岔点处系统 Jacobian 矩阵奇异, 且所研究 New England 系统优化问题的规模较大(优化问题的系统矩阵为 500 多维), 若没有一个良好的初值, 该问题很难求解。因此, 文中提出了针对初值的解决方案: 采用连续法计算 FUHB 点处系统平衡点, 并通过小扰动分析求得左右特征向量, 一并作为最优 Hopf 分岔控制问题的初值。

分岔控制的可选参数有很多, 但各个参数对分岔指标的作用强度不同, 如前文最优鞍结分岔控制的优化结果就表明, 最终的优化策略只需要调节某几个控制变量。一般而言, 发电机励磁增益 K_A 可以作为有效的 Hopf 分岔控制变量, 这里首先选择所有机组的励磁增益 $[K_A^1, K_A^2, \dots, K_A^{10}]$ 作为控制变量, 结合上面的初值预测方法进行最优 Hopf 分岔控制, 但所用的 SQP 法无法迭代收敛。因此, 必须采用其它更有效的优化算法, 或者减少控制变量的个数。

这里采用模态分析法进行控制变量选择, 以减少控制变量。首先, 通过分岔分析(连续法)求得系统 FUHB 处特征根的虚部为 $\pm j5.21$ 。然后, 根据连续法跟踪特征根变化, 发现失稳特征根所对应的初始系统特征根为 $-0.0139 \pm j5.4494$ 。最后, 通过小扰动模态分析法计算与振荡模式 $-0.0139 \pm j5.4494$ 强相关的状态量, 包括: 9 号发电机的 δ, ω , 参与因子为 1.0; 5 号发电机的 δ, ω , 参与因子为 0.7。因此, 选择 5 号发电机和 9 号发电机的励磁增益 $[K_A^5, K_A^9]$ 为控制变量。目标函数 $C(K_A) = |K_A^{\text{con}} - K_A^0|^T w_{K_A}$, 其中 $w_{K_A} = [1, 1, 1]$ 。

最优 Hopf 分岔控制结果: SQP 法计算迭代 58 次收敛, 控制结果 $\mu_{\text{HFB}}=0.16$, 控制代价为 $C(K_A)=0.78$ 。需要注意的是此处的控制代价与前面的控制代价意义不同, 不同控制手段的控制代价大小不具有可比性。控制变量的优化结果如表 2 所示, 只需要调节 9 号发电机的励磁增益为 4.22 就可实现所需的控制目标。

表 2 New England 系统小扰动最优 Hopf 分岔控制前后励磁增益对比

Tab.2 AVR gains before and after OSNBS of New England 39-bus test system

发电机标号	K_A	
	优化前	优化后
5	40	40
9	5	4.22

5 结论

对小扰动稳定控制的概念和研究现状进行讨论, 指出了该问题的研究瓶颈, 结合可行域的概念, 把小扰动稳定控制描述为“保证系统不可控分岔参数 $\mu \geq \mu^{\text{ref}}$, 在系统小扰动参数稳定域 Ω_{SSR} 内寻找最优的可控参数组合以保证系统的控制代价最小”这样一个最优分岔控制问题, 澄清了描述该类问题时的概念混乱; 建立了最优鞍结分岔控制和最优 Hopf 分岔控制的数学模型, 模型包含各种不等式约束, 从数学上严格保证了电力系统安全性和经济性的最优控制。

在 New England 39 节点系统中研究了一个小扰动最优鞍结分岔控制算例, 实现了以励磁参考电压为控制变量的最优分岔控制策略; 针对最优 Hopf 分岔控制优化规模较大、求解困难的问题, 提出了初值预测和基于模态分析的控制变量选择方案, 实现了大系统中的最优 Hopf 分岔控制策略。优化控制结果表明, 所提出的控制策略可以有效解决小扰动稳定控制问题。

参考文献:

- [1] CHATTOPADHYAY D, CHAKRABARTI B B. Reactive power planning incorporating voltage stability[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2002, 24(3): 185-200.
- [2] 刘明波. 计及静态电压稳定约束的无功优化规划[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(5): 21-25.
LIU Ming-bo. Optimal reactive power planning incorporating steady state voltage stability constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(5): 21-25.
- [3] 刘大鹏, 唐国庆, 雷宪章, 等. 选择最佳 TCSC 安装地点提高电力系统电压稳定性[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(3): 16-19.
LIU Da-peng, TANG Guo-qing, LEI Xian-zhang, et al. Improving power system voltage stability in terms of optimal placement of TCSC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(3): 16-19.
- [4] CANIZARES C A. IEEE-PES voltage stability assessment: concepts, practices and tools[R]. [S.l.]: IEEE/PES Power System Stability Subcommittee, 2002.
- [5] CANIZARES C A, MITHULANANTHAN N, BERIZZI A. On the linear profile of indices for the prediction of saddle-node and limit-induced bifurcation points in power systems[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems-I: Fundamental Theory and Applications, 2003, 50(12): 1588-1595.
- [6] WU Q, POPOVIC D H, HILL D J. Avoiding sustained oscillations in power systems with tap changing transformers[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2000, 22(8): 597-605.
- [7] 韩文, 韩祯祥. 一种判别电力系统电压稳定和功角稳定的新方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 367-368.
HAN Wen, HAN Zhen-xiang. A new method identifying voltage stability and angle stability[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 367-368.
- [8] 吴浩, 韩祯祥. 电压稳定和功角稳定关系的平衡点分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(12): 28-31.
WU Hao, HAN Zhen-xiang. Analysis of the relationship between voltage stability and angle stability through equilibriums[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(12): 28-31.
- [9] ZHOU Y, AJJARAPU V. A fast algorithm for identification and tracing of voltage and oscillatory stability margin boundaries[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 934-946.
- [10] JI W, VENKATASUBRAMANIAN V. Dynamics of a minimal power system: invariant tori and quasi-periodic motions[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 1995, 42(12): 981-1000.
- [11] 陈举华, 徐楠. 电力系统小扰动稳定域应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 52-57.
CHEN Ju-hua, XU Nan. Application research on small stability analysis of power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 52-57.
- [12] 余贻鑫, 贾宏杰, 王成山. 电力系统中的混沌现象与小扰动稳定域[J]. 中国科学: E 辑, 2001, 31(5): 431-441.
YU Yi-xin, JIA Hong-jie, WANG Cheng-shan. Chaotic phenomena and small signal stability region of electrical power systems[J]. Science in China: Series E, 2001, 31(5): 431-441.
- [13] GU Wei, MILANO F, JIANG Ping, et al. Hopf bifurcations induced by SVC controllers: a didactic example[J]. Electric Power Systems Research, 2007, 77(3): 234-240.
- [14] 陈关荣. 控制动力系统的分岔现象[J]. 控制理论与应用, 2001, 18(2): 153-159.
CHEN Guan-rong. Controlling bifurcations in dynamical systems[J]. Control Theory and Applications, 2001, 18(2): 153-159.
- [15] 夏可青. 电力市场环境下的无功优化规划的研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
XIA Ke-qing. Optimal reactive power planning in power market[D]. Nanjing: Southeast University, 2005.
- [16] 顾伟. 电力系统最优分岔控制研究[D]. 南京: 东南大学, 2006.
GU Wei. Optimal bifurcation control in power systems[D]. Nanjing: Southeast University, 2006.
- [17] GU Wei, MILANO F, JIANG Ping, et al. Improving large-disturbance stability through optimal bifurcation control and time domain simulations[EB/OL]. (2007-04-11). <http://www.sciencedirect.com/science/journal/03787796>.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

顾伟(1981-), 男, 江苏邳州人, 讲师, 博士, 主要研究方向为电力系统稳定控制、电力电子技术、电能质量等(E-mail: wgu@seu.edu.cn);

蒋平(1954-), 男, 江苏溧阳人, 教授, 主要研究方向为电力系统运行控制和电力电子在电力系统中的应用;

唐国庆(1937-), 男, 江苏南京人, 教授, 博士研究生导师, 主要研究方向为电力系统控制、人工智能在电力系统中的应用等。

Optimal bifurcation control to improve small-signal stability of power systems

GU Wei, JIANG Ping, TANG Guo-qing

(Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Combined with the conception of small signal stability region, it is suggested to define the small signal stability control as the optimal bifurcation control—"With the uncontrollable bifurcation parameter $\mu \geq \mu^{\text{ref}}$, the optimal configuration of controllable parameters is searched in the small signal stability region to ensure the minimum control costs". The mathematic models of optimal saddle-node bifurcation control and optimal Hopf bifurcation control are presented including all kinds of unequal constraint conditions, which strictly ensure the optimal control in both security and economy of power systems. An optimal saddle-node bifurcation control approach, which takes AVR reference voltages as control parameters, is tested in New England 39-bus test system. The initial value prediction and the control parameter selection are proposed for the optimal Hopf bifurcation control of large system. Simulation results show the effectiveness of proposed small-signal stability control strategy.

Key words: optimal bifurcation control; small-signal stability region; aperiodic instability; oscillatory instability