

提高电力系统大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 电气工程学院,江苏 南京 210096)

摘要: 仿真研究了大扰动参数稳定域 Ω_{LDSR} 和小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 的关系,提出了几个合理的假设,据此假设提出了通过收缩相应故障后小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 来近似等效大扰动参数稳定域 Ω_{LDSR} 的方法。结合上述收缩 Ω_{SSSR} 的方法,提出了基于最优分岔控制策略的电力系统大扰动稳定控制方案。对 WSCC 3 机 9 节点系统采用最优 Hopf 分岔控制策略,通过 3 个控制步实现了对发电机励磁增益的优化控制,保证了系统大扰动稳定性;对 New England 39 节点系统采用最优鞍结分岔控制策略,以发电机励磁参考电压为优化变量进行大扰动稳定控制,结果表明,该控制策略可以有效解决此问题。

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)11-0012-06

大扰动稳定控制也称为暂态稳定控制^[1-10],其主要任务是控制当前系统达到满足大扰动稳定性的运行状态,而使其控制代价最小。目前,对于该问题的研究存在 2 个难点^[1]:一是运算量大,通过并行处理可以更快地完成该运算过程;二是系统稳定域的解析非常困难,使得相应控制策略的确定带有较大误差。在此将主要探讨第 2 点的解决方案。

1 大扰动稳定控制研究现状

系统大扰动失稳方式有 2 种^[11]:一种是故障后系统不存在新的静态稳定平衡点;另一种是故障后的系统存在静态稳定平衡点,但是系统无法过渡到这个新的稳定平衡点。这里统一描述为系统大扰动后失去稳定并以单调或振荡方式失稳。下面简介大扰动稳定控制的几种方法。

1.1 基于 Lyapunov 直接法的计算方法

目前,国内外使用较多的直接法包括:基于相关不稳定平衡点求解的相关不稳定平衡点法(RUEP 法)^[12-14];基于最大势能搜索的势能边界法(PEBS 法)^[15-16];基于单机无穷大等值的扩展等面积准则法(EEAC 法)^[4-7]。上述 3 种方法在计算中为了求取临界能量 E_{cr} ,均作了一定的假设,因此在所作假定和实际系统情况不一致时,会引起误差甚至在某些情况下计算失败^[17]。

RUEP 法的主要问题在于失稳模式判别及不稳定平衡点(UEP)求解的速度和收敛问题。为计算系统临界能量,RUEP 法需要先判别系统的失稳模式,即把系统机组分为严重受扰机群和剩余机群,并认为系统失稳模式为这 2 个机群间失步。而扰动初始

时系统信息不足,故可能发生失稳模式判断失误问题,或者可能系统失步为 2 个以上机群,均会引起误差。RUEP 法在判别失稳模式后,用 Newton 法求解与该失稳模式对应的 RUEP,这时存在着 UEP 求解的收敛性和计算速度的问题。

PEBS 法严格意义上应搜索故障临界切除时间相应的系统转子角轨迹(称为临界轨迹)上势能 E_{p} 达到最大值的点,并以此作为临界能量 E_{cr} 。但由于临界切除时间不可能预先知道,故实际上采用持续故障轨迹代替临界轨迹,并在此轨迹上搜索 E_{p} 达最大值的点,以此时 E_{p} 作为 E_{cr} 的近似值。这就带来 PEBS 法的 2 个主要问题:一是用持续故障轨迹代替临界轨迹会带来 E_{cr} 的误差,若两者轨迹相距较远,会引起 E_{cr} 较大误差;二是 PEBS 法用于大系统计算时,计算速度比较慢。

EEAC 法的优点在于计算速度特别快,而且可对稳定度作解析分析,并在简单模型及扰动时可对稳定度的灵敏度作解析分析。其主要问题是故障点不在机端时,有时失稳模式较难判别;此外,在单机无穷大等值时作的假定可能引起较大误差,造成计算结果的可信度问题。但 EEAC 法近年来发展迅速,集成 EEAC(IEEAC)以及动态 EEAC(DEEAC)的提出较大地改进了 EEAC 法的计算精度。另外,能量函数法只能解决第一摆稳定问题,对多摆问题尚不能用能量函数法解决^[17](因必须精确计及各种阻尼因素及其对能量函数的影响),而 EEAC 法则可以判别多摆失稳问题^[18]。

1.2 基于时域仿真法的算法

时域积分法在非线性运动稳定性的研究中得到了广泛的应用,但其计算量大,需要专家经验提供定性结论,没有量化能力。在最优潮流中最通常的方

法是先求取无暂稳约束下的最优解,再用数值积分校核^[19-21]。这样的处理虽然在数学模型的形式上含有表示暂态稳定约束的代数不等式,但并非真正的暂态稳定约束优化。如果校核表明系统不稳定,算法并不能指导如何通过控制来修正原最优解,更无法考虑紧急控制措施^[2]。

1.3 基于非线性逼近的方法

采用多项式^[22]或者神经网络^[23-24]可对系统性能函数进行任意精度逼近,形成一个针对控制量的逼近函数,解决大扰动稳定分析和控制问题。非线性逼近法的优点是计算速度快,特别适合在线应用,其缺点是很难找到准确的逼近函数。

2 大扰动参数稳定域

基于大扰动稳定控制的研究现状,发现其存在的一个主要瓶颈就是准确解析稳定边界的困难。直接法存在计算精度、收敛性和判别失稳模式的问题,数值法存在计算速度和无法提供指导稳定控制量化指标的问题,而非线性逼近法很难找到精确的逼近函数。文献[25]中成功利用小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 作为优化控制的稳定约束,结合最优分岔控制策略,实现了电力系统小扰动稳定的最优控制。若能求得大扰动下这样一个类似的参数稳定域 Ω_{LDSR} ,就可以解析大扰动稳定边界。再结合文献[26]最优分岔控制思想,可实现系统大扰动稳定的最优控制。但传统动力学理论已说明,分岔只能研究系统的小扰动稳定性,并不能用来研究系统大扰动稳定性。

2.1 2类参数稳定域的关系

下文将对上面提出的大扰动参数稳定域 Ω_{LDSR} 和小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 间的相互关系作一些探讨,以期得到 Ω_{LDSR} 的近似方法。

定理1 系统在某一扰动下的参数稳定域是相应扰动后小扰动稳定域的子集,即

$$\Omega_{LDSR} \subset \Omega_{SSSR} \quad (1)$$

若大扰动稳定,其相应小扰动肯定稳定,该定理是一个保守的估计。

假设1:电力系统是负荷稳定的,负荷水平越低,系统稳定裕度越高。

这个假设很容易证明,如系统在无负荷和无发电状态下肯定稳定。

假设2:在参数空间的稳定域中,通过增加稳定指标提高系统小扰动稳定性,其大扰动稳定性也相应增加,即

$$\frac{\partial \mu_{SD}}{\partial p} / \frac{\partial \mu_{LD}}{\partial p} \geq 0 \quad (2)$$

其中, μ_{SD} 和 μ_{LD} 分别为小扰动和大扰动下系统的临界负荷因子,可以用于标识该系统对小扰动和大扰动的稳定裕度。

这里大扰动稳定性的增加体现在2个方面:一是可以在更高水平负荷下承受相同扰动而保持稳定;二是相同负荷水平和扰动下,系统从扰动不稳定变为扰动稳定。

2.2 大扰动参数稳定域的近似求取方法

根据前面的分析,在 (μ, p) 组成的参数空间中,有如下结论:

a. $\Omega_{LDSR} \subset \Omega_{SSSR}$, 即定理1;

b. $\frac{\partial \mu_{SD}}{\partial p} / \frac{\partial \mu_{LD}}{\partial p} \geq 0$, 即假设2。

因此,可以通过收缩相应故障后小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 来近似等效 Ω_{LDSR} ,如图1所示。

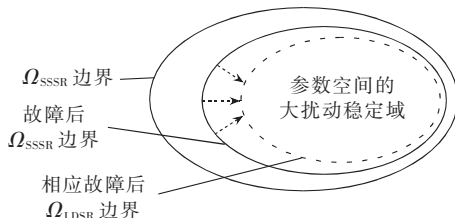


图1 故障后的小扰动参数稳定域和大扰动参数稳定域

Fig.1 Post - contingency small - signal stability region and large - disturbance stability region

若采用不可控参数 μ 标识系统稳定裕度,则有

$$\mu_{SD} > \mu_{LD} \quad (3)$$

$$\mu_{SD} = \mu_{LD} + \sigma \quad (4)$$

其中, σ 为反映系统故障严重程度的一个补偿值,其值的确定方法将在下文中给出。

3 大扰动稳定的最优分岔控制

3.1 大扰动最优分岔控制模型

基于大扰动参数空间稳定域 Ω_{LDSR} 的最优控制模型:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(p) \\ \text{s.t.} \quad & 0 = f(x, y, \mu, p) \\ & 0 = g(x, y, \mu, p) \\ & (\mu, p) \in \Omega_{LDSR} \\ & h(x, y, \mu, p) \leq 0 \end{aligned} \quad (5)$$

结合式(4),上述问题描述为

$$\begin{aligned} \min \quad & C(p) \\ \text{s.t.} \quad & 0 = f(x, y, \mu_{SD}, p) \\ & 0 = g(x, y, \mu_{SD}, p) \\ & \text{分岔条件} \\ & \sigma \leq \mu_{SD} \\ & h(x, y, \mu_{SD}, p) \leq 0 \end{aligned} \quad (6)$$

进一步结合文献[25]中的最优分岔控制概念,用 μ_{SNB}^{Cont} 和 μ_{GIB}^{Cont} 分别代表故障后系统的鞍结分岔和Hopf分岔指标,并替代式(6)中的 μ_{SD} ,可得:

$$\begin{aligned} \min \quad & C(p) \\ \text{s.t.} \quad & 0 = f(x, y, \mu_{SNB}^{Cont}, p) \\ & 0 = g(x, y, \mu_{SNB}^{Cont}, p) \\ & f_x u_x + f_y u_y = 0 \\ & g_x u_x + g_y u_y = 0 \\ & u_x^T u_x = 1 \\ & \mu_{SNB}^{Cont} \geq \sigma \\ & h(x, y, \mu_{SNB}^{Cont}, p) \leq 0 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned}
& \min C(p) \\
& \text{s.t. } 0=f(x, y, \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}}, p) \\
& \quad 0=g(x, y, \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}}, p) \\
& \quad f_x u_{xR} + f_y u_{yR} + \beta u_{xI} = 0 \\
& \quad f_x u_{xI} + f_y u_{yI} - \beta u_{xR} = 0 \\
& \quad g_x u_{xR} + g_y u_{yR} = 0 \\
& \quad g_x u_{xI} + g_y u_{yI} = 0 \\
& \quad u_{xR}^T u_{xR} - u_{xI}^T u_{xI} - 1 = 0 \\
& \quad u_{xR}^T u_{xI} + u_{xI}^T u_{xR} = 0 \\
& \quad \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}} \geq \sigma \\
& \quad h(x, y, \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}}, p) \leq 0
\end{aligned} \quad (8)$$

式(7)(8)就是最终分别通过最优鞍结分岔控制和最优 Hopf 分岔控制实现系统大扰动稳定最优控制的优化模型。需要注意的是, $h(x, y, \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}}, p) \leq 0$ 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。

3.2 大扰动最优分岔控制的实现

鞍结分岔是系统的固有分岔, 但系统中不一定会出现 Hopf 分岔。若系统存在 Hopf 分岔, 一般出现在鞍结分岔或极限诱导分岔之前, 系统稳定性由 Hopf 分岔指标决定, 此时只需进行 Hopf 分岔控制来把 Hopf 分岔点延迟到稳定区域内, 就可保证稳定, 不需要考虑鞍结分岔; 若系统不存在 Hopf 分岔, 则其稳定性由鞍结分岔决定, 此时的分岔控制为鞍结分岔控制。

求解式(7)(8)问题的一个难点是 σ 值的确定, σ 无显式解, 这里结合时域仿真的学习经验, 采用按照一定步长逐步增加的数值逼近方法近似得到 σ 。

大扰动稳定最优分岔控制策略的计算流程如图 2 所示。

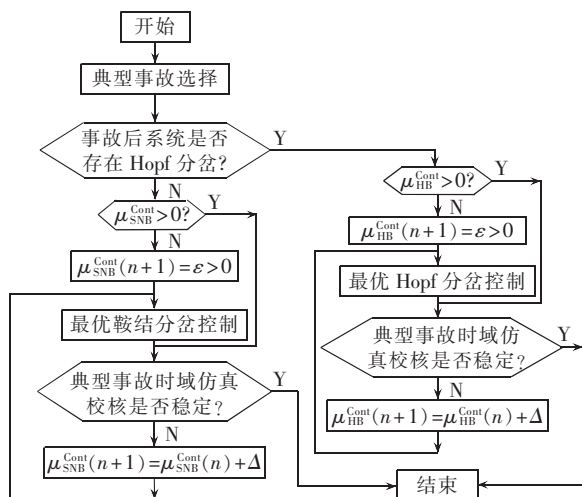


图 2 大扰动稳定最优分岔控制策略的实现流程

Fig.2 Flowchart of optimal bifurcation control for large-disturbance stability

判断故障后是否存在 Hopf 分岔有 2 种方法。

a. 近似法。若故障后系统振荡失稳, 则认为存在 Hopf 分岔; 否则, 认为不存在。

b. 精确法。离线计算时, 通过“准静态+小扰动分析”判断是否存在 Hopf 分岔。

Δ 为一个近似经验值, 针对不同的系统运行状况和故障类型可取不同值。 Δ 取值过大, 优化计算时间大为缩短, 但优化结果会过于保守; Δ 取值过小, 最优化结果精确, 但计算时间会大为延长。针对离线和在线控制的不同要求, 可以采用不同的 Δ 值。

控制步长的经验方法有如下 2 种:

a. 对三相短路接地等严重故障, 最优鞍结分岔控制时取 $\Delta = 0.05(\mu_{\text{SNB}}^{\text{Norm}} - \mu_{\text{SNB}}^{\text{Cont}})$, 而最优 Hopf 分岔控制时 $\Delta = 0.05(\mu_{\text{HB}}^{\text{Norm}} - \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}})$;

b. 对次严重故障, 如断线等, 最优鞍结分岔控制时取 $\Delta = 0.01(\mu_{\text{SNB}}^{\text{Norm}} - \mu_{\text{SNB}}^{\text{Cont}})$, 而最优 Hopf 分岔控制时 $\Delta = 0.02(\mu_{\text{HB}}^{\text{Norm}} - \mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}})$ 。

具体可根据实际情况再作调整。

所提方法实际上体现了一种算法混合的思想, 即在分岔控制中结合了数值仿真, 吸取了分岔指标构造简单、易于求取并可进行定量分析的优势, 而对优化后的结果进行数值仿真校核判别稳定性。另外, 此方法不受系统模型的限制, 可以有效考虑振荡失稳(多摆失稳)问题, 这使得它对传统暂态能量函数法(TEF 法)有较大优势。

4 算例分析

4.1 大扰动最优 Hopf 分岔控制算例

对 WSCC 3 机 9 节点系统的失稳场景进行最优 Hopf 分岔控制, 保证系统在此“N-1”故障下稳定, 并使控制代价最小。

4.1.1 系统运行状况及预处理

系统动静态参数详见文献[25], 而且 $K_{A1} = K_{A2} = K_{A3} = 100$ 。

假设当前系统运行在 $\mu_0 = 0.1$ 的负荷水平下 ($\mu_0 = 0$ 代表初始负荷水平)。

文献[25]的研究表明, 该系统存在 Hopf 分岔。因此, 从 Hopf 分岔指标收缩的角度选择典型故障进行分析控制。考虑与 3 个负荷相连的 6 条线路发生“N-1”故障, 选择 $\mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}}$ 最小的故障为本文分析的典型故障。分析结果表明, 线路 7-8 发生断线故障时 $\mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}} = 0$, 而其余线路故障时 $\mu_{\text{HB}}^{\text{Cont}} > 0$ 。所以, 选择 7-8 断线为典型故障。

图 3 为不控制时, 系统超出 Hopf 分岔运行点所引起的振荡失稳; 若调节 $K_{A1} = K_{A2} = K_{A3} = 150$, 则发生故障后, 系统很快稳定, 如图 4 所示, 但此时为过量控制。

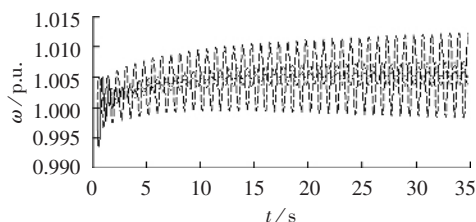


图 3 断线故障时域仿真曲线 ($K_{A1} = K_{A2} = K_{A3} = 100$)

Fig.3 Time domain simulative waveform of line break fault ($K_{A1} = K_{A2} = K_{A3} = 100$)

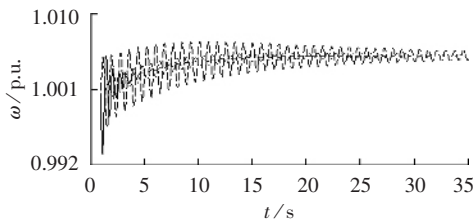
图 4 断线故障时域仿真曲线 ($K_{A1}=K_{A2}=K_{A3}=150$)

Fig.4 Time domain simulative waveform of line break fault ($K_{A1}=K_{A2}=K_{A3}=150$)

4.1.2 大扰动最优 Hopf 分岔控制

故障前和故障后系统的 Hopf 分岔指标分别为 $\mu_{HB}^{Norm}=0.32$, $\mu_{HB}^{Cont}=0$ 。最优 Hopf 分岔控制信息如下所示:

控制变量 所有机组的励磁增益 $[K_A^1, K_A^2, K_A^3]$;

优化目标 $C(K_A) = (K_A^{con} - K_A^0)^T w_{KA}$, $w_{KA} = [1, 1, 1]$;

不等约束 $0.95 \leq U_i \leq 1.15$, $\sigma \leq \mu_{HB}^{Cont}$;

优化算法 序列二次规划法 (SQP);

步长 $\Delta = 0.02(\mu_{HB}^{Norm} - \mu_{HB}^{Cont}) = 0.02(0.32 - 0) = 0.0064$ 。

以 $[K_A^1, K_A^2, K_A^3]$ 为控制变量, 进行最优 Hopf 分岔控制。优化控制过程 3 步后完成, $\mu_{HB}^{Cont}(3) = 0.0192$, 优化结果为只调节 2 号机励磁控制增益 $K_A^2 = 118.675$, 控制代价为 $C(K_A) = 18.675$ 。实际控制结果为 $K_A^2 = 120$, $C(K_A) = 20$ 。详细优化控制过程见表 1。

表 1 大扰动最优 Hopf 分岔控制的实现过程
Tab.1 Steps of large - disturbance OHBC

控制步数	μ_{HB}^{Cont}	K_A^1	K_A^2	K_A^3
1	0.0064	100	107.545	100
2	0.0128	100	112.985	100
3	0.0192	100	118.675	100

图 5 为采用上述最终优化控制结果调节 $K_A^2 = 120$ 后, 对 7-8 断线故障后系统行为的时域仿真, 此时系统临界稳定。可见, 采用所提出的大扰动稳定最优 Hopf 分岔控制策略, 可以有效地以最小控制代价实现消除原有故障后的振荡失稳现象。

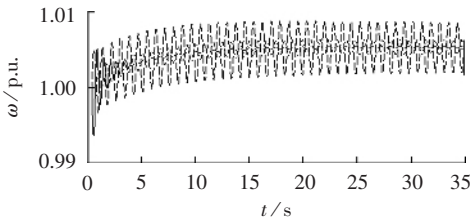
图 5 断线故障时域仿真曲线 ($K_{A1}=K_{A3}=100, K_{A2}=120$)

Fig.5 Time domain simulative waveform of line break fault ($K_{A1}=K_{A3}=100, K_{A2}=120$)

4.2 大扰动最优鞍结分岔控制算例

采用 New England 10 机 39 节点系统进行最优鞍结分岔控制。

4.2.1 系统运行状况及预处理

系统静态参数详见文献[25]。对研究系统略作改动: 负荷节点 12 和 15 处分别投入了 50 Mvar 的并联电容器, 其中 4、12、15 处的负荷为感应电动机。

假设当前系统运行在 $\mu_0 = 0.14$ 的负荷水平下。 ($\mu_0 = 0$ 代表初始负荷水平)。

典型故障选为母线 15-16 间发生三相断线故障。计算系统故障后分岔边界, 主要关心的是鞍结分岔和 Hopf 分岔。随负荷因子增加, 系统所有特征根始终在虚轴左侧, 在 $\mu = 0.165$ 时, Jacobi 矩阵出现一零特征根, 系统发生鞍结分岔。在此过程中, 系统不出现 Hopf 分岔点, 同样由于各发电机的无功极限较大, $E_{fd}^n \in (-5, 5)$, 极限诱导分岔也没有出现。

$\mu = 0.14$ 时, 在 $t = 1.10$ s 系统发生 15-16 三相断线故障, 时域仿真结果如图 6 所示 (U 为母线电压, s 为感应电动机滑差, 后同)。仿真时间 $t > 11$ s 后, 感应电动机电压小于 0.5 p.u., 系统发生与鞍结分岔强相关的大扰动电压失稳场景。

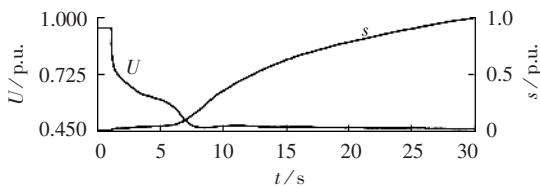


图 6 断线故障时域仿真曲线 (无控制)

Fig.6 Time domain simulative waveform of line break fault (without control)

4.2.2 大扰动最优鞍结分岔控制

下面将针对上述与鞍结分岔强相关的大扰动电压失稳场景进行控制。故障前后系统的鞍结分岔指标分别为 $\mu_{SNB}^{Norm} = 0.96$, $\mu_{SNB}^{Cont} = 0.025$ 。最优鞍结分岔控制信息如下所示:

控制变量 所有机组的励磁参考电压

$$[U_{ref}^{30}, U_{ref}^{31}, \dots, U_{ref}^{39}];$$

优化目标 $C(U_{ref}) = (U_{ref}^{con} - U_{ref}^0)^T w_{Uref}$;

不等约束 $0.95 \leq U_i \leq 1.05$, $\sigma \leq \mu_{SNB}^{Cont}$;

优化算法 序列二次规划法 (SQP)。

系统 10 台发电机都有较大的无功裕度, 以 $[U_{ref}^{30}, U_{ref}^{31}, \dots, U_{ref}^{39}]$ 为控制变量, 进行最优鞍结分岔控制, 从 15-16 断线时的鞍结分岔点进行控制, 此时 $\mu_{SNB}^{Cont} = 0.025$, 系统处于 Ω_{SSSR} 边界上。设各励磁参考电压的单位控制代价相同, $w_{Uref} = [10, 10, \dots, 10]$, 取分岔控制步长 $\Delta = 0.01(\mu_{SNB}^{Norm} - \mu_{SNB}^{Cont}) = 0.00935 \approx 0.01$ 。

优化结果 $\mu_{SNB}^{Cont}(2) = 0.045$, 即在系统负荷水平从 $\mu = 0$ 增加到 $\mu = 0.14$ 时, 为保证系统此“N-1”大扰动稳定性, 其最经济的控制措施是保证故障后 $\mu_{SNB}^{Cont} = 0.045$ 的最优鞍结分岔控制, 采用 SQP 法求解, 每一步大约迭代 70 次收敛, 优化结果如表 2 所示, 控制

表 2 大扰动最优鞍结分岔控制优化结果

Tab.2 Results of large-disturbance OSNB

母线 标号	$U_{ref}/p.u.$		母线 标号	$U_{ref}/p.u.$	
	优化前	优化后		优化前	优化后
30	1.2451	1.2451	35	1.4137	1.4137
31	1.3720	1.3720	36	1.4027	1.4027
32	1.3338	1.4038	37	1.3316	1.3316
33	1.3429	1.4451	38	1.3754	1.3838
34	1.6703	1.7534	39	1.2060	1.2060

代价 $C(U_{\text{ref}})=2.635$ 。表 2 中的优化结果表明,只需要调节几台机组的励磁参考电压,多数不需要动作。

图 7 为采用表 2 最终优化控制结果调节 U_{ref} 后,对 15-16 断线故障后系统行为的时域仿真,此时系统临界稳定。可见,采用所提出的大扰动稳定的最优鞍结分岔控制策略,可以有效地以最小控制代价实现消除典型故障后由感应电动机引起的单调电压失稳现象。

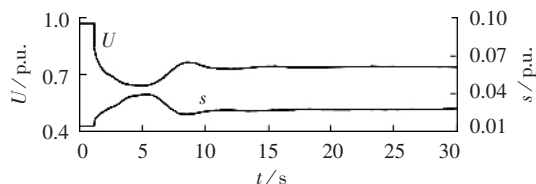


图 7 断线故障时域仿真曲线(最优鞍结分岔控制)

Fig.7 Time domain simulative waveform of line break fault(with OSNBC)

5 结论

首先,仿真研究了大扰动参数稳定域 Ω_{LDSR} 和相应故障后小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 的关系,然后提出了几个合理的假设,据此假设提出了通过收缩相应故障后小扰动参数稳定域 Ω_{SSSR} 来近似等效 Ω_{LDSR} 的方法。最后,结合上述收缩 Ω_{SSSR} 的方法,提出了基于最优分岔控制策略的电力系统大扰动稳定控制方案。

WSCC 3 机 9 节点发生“N-1”线路开断故障后,会发生振荡失稳现象,采用上述最优 Hopf 分岔控制策略,通过 3 个控制步实现对发电机励磁增益的优化控制,保证了系统大扰动稳定性,解决了传统 TEF 法所不能考虑的振荡失稳(多摆失稳)问题;New England 39 节点系统发生“N-1”线路开断故障后,系统直接以单调形式失稳,且系统故障前后均不存在 Hopf 分岔点,故采用最优鞍结分岔控制策略,分别以发电机励磁参考电压和并联电容补偿容量为优化变量,进行该系统大扰动的稳定控制,优化控制结果表明,该控制策略可以有效解决此问题。

参考文献:

- [1] 甘德强,辛焕海,王建全. 暂态稳定预防控制和优化新进展[J]. 电力系统自动化,2004,28(10):1-7.
GAN De-qiang,XIN Huan-hai,WANG Jian-quan. Progress in transient stability preventive control and optimization[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(10):1-7.
- [2] 李威,薛禹胜,HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(二)不同失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化,2003,27(21):7-10.
LI Wei,XUE Yu-sheng,HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability. Part two:for cases with different unstable modes[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(21):7-10.
- [3] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化,2002,26(4):1-4.
XUE Yu-sheng. Coordinations of preventive control and emergency control for transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(4):1-4.
- [4] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较(四)回顾与瞻望[J]. 电力系统自动化,2001,25(14):1-6.
XUE Yu-sheng. A critical comparison of various methods for transient stability assessment. Part four:status and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(14):1-6.
- [5] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较(三)定性判稳与定量分析[J]. 电力系统自动化,2001,25(13):1-5.
XUE Yu-sheng. A critical comparison of various methods for transient stability assessment. Part three:qualitative criterion and quantitative analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(13):1-5.
- [6] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较(二)壁垒点与观察点[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):1-7.
XUE Yu-sheng. A critical comparison of various methods for transient stability assessment. Part two:barrier point and the observation point[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(12):1-7.
- [7] 薛禹胜. EEAC 与直接法的机理比较(一)受扰程度函数[J]. 电力系统自动化,2001,25(11):6-11.
XUE Yu-sheng. A critical comparison of various methods for transient stability assessment. Part one:disturbed-measure functions[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(11):6-11.
- [8] 薛禹胜,李威. 关于暂态稳定控制决策优化方法的思考[J]. 电力系统自动化,2003,27(10):15-21.
XUE Yu-sheng,LI Wei. A review on the optimization of transient stability controls [J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(10):15-21.
- [9] 薛禹胜,李威,HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(一)单一失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化,2003,27(20):6-10.
XUE Yu-sheng,LI Wei,HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability. Part one:for cases with a unique unstable mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(20):6-10.
- [10] PAVELLA M,ERNST D,RUIZ-VEGA D. Transient stability of power systems;a unified approach to assessment and control [M]. Norwell:Kluwer Academic Publisher,2000.
- [11] 赵晋泉,江晓东,李华. 一种基于连续线性规划的静态稳定预防控制方法[J]. 电力系统自动化,2005,29(14):17-22.
ZHAO Jin-quan,JIANG Xiao-dong,LI Hua. A static stability preventive control approach based on successive linear programming[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(14):17-22.
- [12] 王成山,贾宏志,江晓东. 一种寻找正确相关不稳定平衡点的基准方法[J]. 天津大学学报:自然科学与工程技术版,1999,32(5):529-534.
WANG Cheng-shan,JIA Hong-zhi,JIANG Xiao-dong. Standard method for finding correct controlling unstable equilibrium point [J]. Journal of Tianjin University:Science and Technology,1999,32(5):529-534.
- [13] 殷明慧,邹云. 电力系统结构保持模型相关不稳定平衡点方法的判别算法研究[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):83-89.
YIN Ming-hui,ZOU Yun. The methodology studies for controlling UEP method in network structure preserving power system model[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):83-89.
- [14] 殷明慧,邹云. 电力系统结构保持模型相关不稳定平衡点方法的理论分析[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):32-37.

- YIN Ming - hui,ZOU Yun. The theoretical analysis of controlling UEP method in network structure preserving power system model[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(8):32-37.
- [15] CHIANG H D,THORP J S,VARGHESE M. Potential energy boundary surface method:simulation study(power system transient stability analysis)[C]// 26th IEEE Conference on Decision and Control. Los Angeles,CA,USA:IEEE,1987:879-884.
- [16] CHIANG H D,WU F F,VARAIYA P P. Foundations of the potential energy boundary surface method for power system transient stability analysis[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems,1988,35(6):712-728.
- [17] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
- [18] 薛禹胜. 失稳模式变化的机理(五)论暂态能量函数直接法[J]. 电力系统自动化,1994,18(10):11-24.
- XUE Yu - sheng. The mechanisms of instability modes [J]. Automation of Electric Power Systems,1994,18(10):11-24.
- [19] 刘明波,夏岩,吴捷. 计及暂态稳定约束的可用传输容量计算[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):28-33.
- LIU Ming-bo,XIA Yan,WU Jie. Calculation of available transfer capability with transient stability constraints [J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):28-33.
- [20] 孙元章,杨新林,王海风. 考虑暂态稳定性约束的最优潮流问题[J]. 电力系统自动化,2005,29(16):56-59.
- SUN Yuan - zhang,YANG Xin - lin,WANG Hai - feng. Optimal power flow with transient stability constraints in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(16):56-59.
- [21] 袁越,久保川淳司,佐佐木博司. 考虑暂态稳定约束的可用传输能力计算[J]. 电力系统自动化,2004,28(10):34-39.
- YUAN Yue,KUBOKAWA J,SASAKI H. Available transfer capability determination considering transient stability constraints [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(10):34-39.
- [22] SONG Y H,YAO L,MAO P. Fast estimation of transient stability limits by combining direct method with least squares technique [J]. Electric Power Systems Research,1998,48(2):121-126.
- [23] FIDALGO J N,LOPES J A P,MIRANDA V. Neural networks applied to preventive control measures for the dynamic security of isolated power systems with renewables[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1996,11(4):1811-1816.
- [24] 褚晓东,刘玉田,邱夕兆. 基于径向基函数网络的暂态稳定极限估计与预防控制[J]. 电力系统自动化,2004,28(10):45-48.
- CHU Xiao - dong,LIU Yu - tian,QIU Xi - zhao. Transient stability limit estimation and preventive control based on radial basis function networks [J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(10):45-48.
- [25] 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.
- [26] 顾伟,蒋平,唐国庆. 提高电力系统小扰动稳定性的最优分岔控制策略[J]. 电力自动化设备,2007,27(10):29-33.
- GU Wei,JIANG Ping,TANG Guo - qing. Optimal biturcation control to improve small - signal stability of power systems [J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(10):29-33.
- [27] ANITHA A,SUBRAMANIAN S,GNANADASS R. FDR PSO -based transient stability constrained optimal power flow solution for deregulated power industry [J]. Electric Power Components and Systems,2007,35(11):1219-1232.
- [28] AMJADY N,MAJEDI S F. Transient stability prediction by a hybrid intelligent system[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(3):1275-1283.
- [29] LOTUFO A D P,LOPES M L M,MINUSSI C R. Sensitivity analysis by neural networks applied to power systems transient stability[J]. Electric Power Systems Research,2007,77(7):730-738.

(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 large - disturbance stability of power systems

GU Wei,JIANG Ping,TANG Guo - qing

(Southeast University,Nanjing 210096,China)

Abstract: The relationship between large - disturbance stability region Ω_{LDSR} and small - signal stability region Ω_{SSSR} is studied and it is suggested based on several rational assumes to approximately identify Ω_{LDSR} by shrinking the corresponding post - contingency Ω_{SSSR} , which is applied in large - disturbance stability control based on optimal bifurcation control. The optimal Hopf bifurcation control is used in WSCC 9 - bus test system to improve the large - disturbance stability by the optimal control of AVR gains through three steps. The optimal saddle - node bifurcation control is used in New England 39 - bus test system to improve the large - disturbance stability with the AVR reference voltages as optimization parameters. Simulation results show the effectiveness of proposed large - disturbance stability control strategy.

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