

含 FACTS 元件的电力系统电压稳定评估

赵晋泉¹, 孙晓明¹, 龚成明², 杨志宏²

(1. 可再生能源发电技术教育部工程研究中心, 河海大学, 江苏省南京市 210098;

2. 国电南瑞科技股份有限公司, 江苏省南京市 210061)

摘要:现代电力系统包含大量柔性交流输电系统(FACTS)元件,研究其电压稳定评估方法具有重要意义。以静止同步并联无功补偿器(STATCOM)和静止同步串联无功补偿器(SSSC)的电源-阻抗模型为基础,建立了含 STATCOM 和 SSSC 的混合电力系统潮流模型,并在极坐标牛顿法潮流的基础上结合交替求解法来求解。为考虑 STATCOM 和 SSSC 的各种限值约束,采用了双向切换逻辑。在此基础上,提出含 FACTS 的电力系统连续潮流算法,以计算负荷裕度和稳定临界点,给出了识别由 STATCOM 和 SSSC 容量越限而导致的极限诱导型分岔点的方法。对 IEEE 30 节点和 IEEE 118 节点 2 个测试算例的计算结果验证了所述方法的有效性。

关键词:电压稳定评估;连续潮流;静止同步并联无功补偿器;静止同步串联无功补偿器;双向切换逻辑;极限诱导分岔点

0 引言

随着技术的不断进步,现代电力系统已经是一个交直流混合、含有大量柔性交流输电系统(FACTS)的混合电力系统^[1]。FACTS 的定义为一类以电力电子技术为基础的并具有其他静止控制器件的交流传输设备^[2]。FACTS 技术的出现弥补了交流网络潮流控制能力不足的弱点。在 FACTS 设备中,2 个比较有代表意义的设备是静止同步并联无功补偿器(STATCOM)和静止同步串联无功补偿器(SSSC)。

电压崩溃是当代电力系统面临的主要风险之一。研究含 FACTS 元件电力系统的电压稳定性十分必要。静态电压稳定评估的理论和方法已相对成熟,基于负荷裕度和稳定临界点计算的电压稳定监视已成为能量管理系统(EMS)中一个必备的组件。在众多求解静态稳定临界点的技术中,连续潮流技术因其实现容易和计算鲁棒性好而被广泛应用。

潮流计算是连续潮流计算的基础。含 FACTS 元件电力系统潮流计算的关键在于如何把 FACTS 新变量及其控制方程与原有的牛顿法中的功率不平衡方程进行接口。

文献[3]采用统一求解法计算含有 FACTS 装置的电力系统潮流,并采用同伦连续法求解混合电力系统的连续潮流。文献[4]将 FACTS 元件的控

制角作为状态变量来考虑自身的功率损耗。文献[5]把所有静态约束方程与 FACTS 元件控制目标方程和内部约束方程联立求解。文献[6]把串联型的无功补偿装置对交流系统的控制作用等效为线路两端的注入功率。文献[7]把上述的等效注入功率的思想加以推广,将注入功率转化为 FACTS 元件等效模型内部参数的函数,然后在联立求解法的基础上提出了一个统一计算模型。文献[8]在给定制变量的前提下,同样利用等效注入的思想在每次潮流迭代的过程中只修改节点不平衡功率,这样就可以充分利用传统潮流计算程序。

上述相关文献中,在潮流计算中引入了 FACTS 元件的等效模型内部参数的上下限约束,并且考虑了 FACTS 元件参数越限以后不同控制方式的转换。本文提出一种处理 STATCOM 和 SSSC 由于调节容量越限而造成的控制方式转变的双向切换逻辑,并将其应用于含 STATCOM 和 SSSC 电力系统的电压稳定评估计算中。对 IEEE 的 2 个算例测试结果表明,所述方法可快速计算负荷裕度和正确识别极限诱导分岔点。

1 STATCOM 和 SSSC 的等效模型

1.1 STATCOM 的等效模型

STATCOM 是通过并联无功补偿方式来控制所连接的交流端参数。如图 1 所示,STATCOM 等效模型包括一个等效电压源和一个等效阻抗^[9]。

图 1 中,定义其等效电压源的幅值和相角分别为 V_{sh} 和 θ_{sh} ,等效阻抗 $1/Z_{sh} = g_{sh} + jb_{sh}$,所连接交流

收稿日期:2011-03-17;修回日期:2011-04-18。

国家自然科学基金资助项目(50607003,51077042);国家科技支撑计划重大项目(2008BAA13B06)。

母线的电压和幅值分别为 V_i 和 θ_i 。

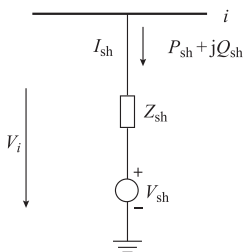


图1 STATCOM的等效模型

Fig.1 Equivalent model of STATCOM

由图1可得:

$$P_{sh} = V_i^2 g_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) + b_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (1)$$

$$Q_{sh} = -V_i^2 b_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh})) \quad (2)$$

STATCOM 与交流母线间没有有功功率的交换,即

$$V_{sh}^2 g_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh}) - b_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh})) = 0 \quad (3)$$

从式(1)~式(3)可以看出,在求解含有 STATCOM 的电力系统潮流方程时,只要求出 V_{sh} 和 θ_{sh} 即可得到 STATCOM 的各个相关的电气量。

STATCOM 有多种控制模式,比较常见的是定 V_i 、定 Q_{sh} 和定 V_{sh} 模式等,其中定 V_i 是 STATCOM 的主控模式,通过改变 STATCOM 提供给交流母线的无功功率来保持交流母线电压的恒定^[9]。

在实际运行中,随着交流系统运行状态的变化,STATCOM 控制母线的电压会发生改变,但由于 STATCOM 的作用,可以使得母线电压维持在一个设定值上。这种维持作用的代价体现在模型中就是 V_{sh} 和 I_{sh} 随着负荷的增长而增大。当 V_{sh} 或 I_{sh} 增加到其约束上限时,STATCOM 就失去原有的调节能力,进而转入定 V_{sh} 或定 I_{sh} 的控制方式。

1.2 SSSC 的等效模型

SSSC 是通过串联无功补偿的方式来控制所连接交流系统的参数。如图2所示,本文采用的是电源阻抗模型^[9]。

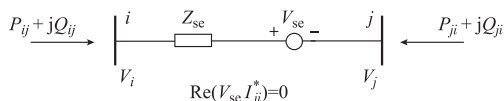


图2 SSSC 的等效模型

Fig.2 Equivalent model of SSSC

图2中,定义其等效电压源的幅值和相角分别为 V_{se} 和 θ_{se} ,等效阻抗 Z_{se} ,所连接交流母线两端的

电压和幅值分别为 V_i, θ_i 和 V_j, θ_j ,交流线路两端的有功和无功功率表示为 $P_{ij}, Q_{ij}, P_{ji}, Q_{ji}$ 。

由图2可得:

$$P_{ij} = V_i^2 g_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ij} + b_{ij} \sin \theta_{ij}) - V_i V_{se} (g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se}) + b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se})) \quad (4)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 b_{ij} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}) - V_i V_{se} (g_{ij} \sin(\theta_i - \theta_{se}) - b_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se})) \quad (5)$$

$$P_{ji} = V_j^2 g_{jj} - V_i V_j (g_{ij} \cos \theta_{ji} + b_{ij} \sin \theta_{ji}) + V_j V_{se} (g_{ij} \cos(\theta_j - \theta_{se}) + b_{ij} \sin(\theta_j - \theta_{se})) \quad (6)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 b_{jj} - V_i V_j (g_{ij} \sin \theta_{ji} - b_{ij} \cos \theta_{ji}) + V_j V_{se} (g_{ij} \sin(\theta_j - \theta_{se}) - b_{ij} \cos(\theta_j - \theta_{se})) \quad (7)$$

式中: $1/Z_{se} = g_{ij} + jb_{ij}, g_{ii} = g_{ij}, b_{ii} = b_{ij}, g_{jj} = g_{ij}, b_{jj} = b_{ij}$ 。

SSSC 与交流线路间没有有功功率的交换,因此有

$$\begin{aligned} \text{Re}(V_{se} I_{ji}^*) &= V_{se}^2 g_{ij} - V_i V_{se} (g_{ij} \cos(\theta_i - \theta_{se}) - b_{ij} \sin(\theta_i - \theta_{se})) + V_j V_{se} (g_{ij} \cos(\theta_j - \theta_{se}) - b_{ij} \sin(\theta_j - \theta_{se})) = 0 \end{aligned} \quad (8)$$

从式(4)~式(8)可知,在求解含 SSSC 电力系统的潮流方程时,只要求出 V_{se} 和 θ_{se} 以及 $V_i, \theta_i, V_j, \theta_j$,即可得出 SSSC 的各个相关电气量。

SSSC 有多种控制模式,比较常见的有定 P_{ji} 、定 Q_{ji} 、定 V_i 和定 V_j 模式等。其中定 P_{ji} 模式是 SSSC 的主控模式,可以通过改变等效电压源的幅值和相角来保持交流线路有功功率的恒定^[10]。在定 V_i 或定 V_j 模式时,则需要将图2中的串联电压源等效为并联在交流线路两侧的电流源来考虑,进而通过控制注入线路两端的等效无功来控制母线的端电压^[11]。

在实际运行中,随着交流系统运行状态的变化,SSSC 所在交流线路上的功率也会随之变化,但由于 SSSC 的作用,可以使得该交流线路的有功功率维持在一个设定值上。这种维持作用的代价体现在本文模型中就是 V_{se} 和 I_{se} 随着负荷的增长而增加。当 V_{se} 或 I_{se} 增加到其约束上限时,SSSC 就失去对功率的控制能力,进而转入定 V_{se} 或定 I_{se} 的控制方式。

2 含 FACTS 电力系统潮流计算交替迭代法

含 FACTS 电力系统的潮流计算方法主要分为联合求解法和交替求解法2种。

联合求解法是将交流系统潮流方程与 FACTS 元件方程联立迭代求解。它很好地考虑了交流系统与 FACTS 元件变量之间的耦合,具有良好的收敛性。但是,联立方程组的雅可比矩阵的稀疏结构恶化了,对角亦不占优,给求解带来困难,计算效率低,且与现有的交流潮流程序不便于接口。

交替求解法是将交流系统潮流方程与 FACTS 元件方程分别交替计算的求解方法。它形式简单、易于实现,只需在原交流潮流程序的基础上叠加 FACTS 元件变量计算部分并修正交流系统相关的计算量,便于利用原有交流系统潮流计算的程序^[12]。本文采用交替求解法来计算含有 STATCOM 和 SSSC 的混合电力系统潮流。

常规的潮流方程可写为:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_{ac}) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\mathbf{x}_{ac}) - \mathbf{P} \\ \mathbf{Q}(\mathbf{x}_{ac}) - \mathbf{Q} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{x}_{ac}$ 为状态变量向量,由交流母线电压幅值和相角组成; $\mathbf{P}$ 和 $\mathbf{Q}$ 分别为各节点给定的有功和无功功率向量。

含 FACTS 元件的电力系统潮流方程可写为:

$$\mathbf{g}(\mathbf{x}_{ac}) = \begin{bmatrix} \mathbf{P}(\mathbf{x}_{ac}) - \mathbf{P} - \mathbf{P}' \\ \mathbf{Q}(\mathbf{x}_{ac}) - \mathbf{Q} - \mathbf{Q}' \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (10)$$

式中: $\mathbf{P}'$ 和 $\mathbf{Q}'$ 为 STATCOM 或 SSSC 所产生的系统等效注入功率。

由式(1)、式(2)以及式(4)~式(7)可知, $\mathbf{P}'$ 和 $\mathbf{Q}'$ 是由其等效模型内部电压幅值 V_s 与相角 θ_s 以及交流母线的电压共同决定的。以节点 i 为例,其等效注入功率为:

$$\begin{cases} P_i' = f_1(V_i, \theta_i, V_s, \theta_s) \\ Q_i' = f_2(V_i, \theta_i, V_s, \theta_s) \end{cases} \quad (11)$$

式中: V_i 和 θ_i 为交流母线 i 的电压幅值和相角。

在进行 STATCOM 或 SSSC 元件潮流计算时,可将其视为已知量,因此 P_i' 和 Q_i' 在文中被处理为 V_s 和 θ_s 的函数,即式(11)又可以写成:

$$\begin{cases} P_i' = f_1(V_s, \theta_s) \\ Q_i' = f_2(V_s, \theta_s) \end{cases} \quad (12)$$

STATCOM 和 SSSC 的控制方程可记为:

$$\Delta F(\mathbf{x}_d) = F(\mathbf{x}_d, f_{\text{Spec}}) = 0 \quad (13)$$

式中: $\mathbf{x}_d$ 代表 STATCOM 和 SSSC 各种控制模式下的各个控制变量; f_{Spec} 为给定的设定值。

在实际计算中,由式(3)或式(8)与式(13)联立即可求得 FACTS 元件的 V_s 和 θ_s 。从式(12)可知,只要求得相应的 V_s 和 θ_s ,那么对应的 P_i' 和 Q_i' 也就可以得到。进而由式(10)即可以求得交流系统的向量 $\mathbf{x}_{ac}$ 。而在得到交流向量 $\mathbf{x}_{ac}$ 后,又可以将其代入式(3)或式(8),再与式(13)联立求得 V_s 和 θ_s 。如此交替迭代求解,直至得到正确的潮流解。

在交流系统潮流计算中,关于发电机无功功率上、下限约束的考虑是通过迭代中节点类型的转换来实现的^[13]。同样,含 FACTS 元件电力系统的潮流计算中,FACTS 元件各种限值的考虑也需要通过迭代中的转换逻辑来实现。本文提出了如下的双向转换逻辑。

向转换逻辑。

以 STATCOM 为例,设其并联在节点 i 上,每次迭代后,存在以下 3 种可能:

1)当 STATCOM 的初始控制模式为定 V_i 时,则每次比较新计算得到的 V_{sh_cal} 与设定的内部电压上、下限 $V_{sh}^{\max}$ 和 $V_{sh}^{\min}$ 的大小,如果 V_{sh_cal} 大于上限 $V_{sh}^{\max}$,则把 V_{sh} 固定为 $V_{sh}^{\max}$;如果计算量小于下限 $V_{sh}^{\min}$,则把 V_{sh} 固定为 $V_{sh}^{\min}$,同时其控制方式也转换为定 V_{sh} ,从而放开对原来的母线电压 V_i 的控制。

2)如果上次迭代过程中 STATCOM 已经处于定 $V_{sh}^{\min}$ 方式了,而在本次迭代时得到的 V_i 比原定的设定值大,那么就说明新的控制方式是有效的,维持不变。如果在本次迭代时得到的 V_i 比原定的设定值小,则要作如下判断:如果 V_{sh_cal} 比 $V_{sh}^{\min}$ 还小,那么维持现有的控制方式;如果 V_{sh_cal} 比 $V_{sh}^{\max}$ 还大,那么也改变控制方式为定 $V_{sh}^{\max}$ 方式;如果 V_{sh_cal} 在 $V_{sh}^{\max}$ 和 $V_{sh}^{\min}$ 之间,那么将控制方式转回定 V_i 方式。

3)如果上次迭代过程中 STATCOM 已经处于定 $V_{sh}^{\max}$ 方式了,而在本次迭代时得到的 V_i 比原定的设定值小,那么就说明新的控制方式是有效的,维持不变。如果在本次迭代时得到的 V_i 比原定的设定值大,则要作如下判断:如果 V_{sh_cal} 比 $V_{sh}^{\min}$ 还小,那么也改变控制方式为定 $V_{sh}^{\min}$ 方式;如果 V_{sh_cal} 比 $V_{sh}^{\max}$ 还大,那么维持现有的控制方式;如果 V_{sh_cal} 在 $V_{sh}^{\max}$ 和 $V_{sh}^{\min}$ 之间,那么将控制方式转回定 V_i 方式。

本文利用改进后的式(2)求得:

$$Q_{sh_old} = -V_i^2 b_{sh} - V_i V_{sh} (g_{sh} \sin(\theta_i - \theta_{sh_old}) - b_{sh} \cos(\theta_i - \theta_{sh_old})) \quad (14)$$

式中: $V_i, \theta_i, V_{sh}, \theta_{sh}$ 均为本次迭代时的当前值; Q_{sh_old} 和 θ_{sh_old} 分别为上一次迭代时的 Q_{sh} 和 θ_{sh} 值。

同样的转换逻辑也适用于 STATCOM 的内部 I_{sh} 越限的情形,只是相应的 I_{sh_cal} 的计算用下式求得:

$$I_{sh} = \left| \frac{\dot{V}_i - \dot{V}_{sh_old}}{Z_{sh}} \right| = \frac{1}{|Z_{sh}|} \cdot \sqrt{V_i^2 + V_{sh_old}^2 - 2V_i V_{sh_old} \cos(\theta_i - \theta_{sh_old})} \quad (15)$$

式中: V_{sh_old} 和 θ_{sh_old} 分别为上一次迭代时的 V_{sh} 和 θ_{sh} 值。

类似的,上述转换逻辑作相应的修改就可适用于 STATCOM 其他的控制模式切换。对于 SSSC 的情形也可以作同样的处理。

3 含 FACTS 电力系统的连续潮流计算

FATCS 元件可以通过对系统参数的控制来改变系统的负荷裕度,从而影响系统的电压稳定性。为了研究含 STATCOM 和 SSSC 等 FACTS 元件

对系统负荷裕度的影响,在前述潮流模型的基础上,采用连续潮流技术计算静态稳定临界点和负荷裕度。

连续法是跟踪非线性动态系统平衡点解轨迹的一种基本方法。将参数 λ 引入潮流方程,式(10)可改写为:

$$g(x_{ac}, \lambda) = \begin{bmatrix} P(x_{ac}, \lambda) - P - P' \\ Q(x_{ac}, \lambda) - Q - Q' \end{bmatrix} = 0 \quad (16)$$

使用对参数 λ 或状态向量 x_{ac} 中的任意分量 $x_{i,ac}$ 的局部参数化方法将解曲线参数化,再通过预测环节、校正环节、步长控制这3个步骤进行分析计算。

在电力系统静态电压稳定评估中,有2种不同的电压崩溃点:鞍结型分岔点(SNBP)和极限诱导型分岔点(LIBP)^[14]。后者通常是由于发电机无功功率到达极限引发的。由前述分析可知,类似的,STATCOM和SSSC的可调容量极限也可能导致LIBP。在电压稳定评估中,准确地识别和区分这2种不同类型的分岔点,其意义不仅在于可以准确地辨识系统的薄弱环节,而且在于可以准确计算在分岔点处各种控制变量对于稳定裕度的灵敏度,从而保证预防控制的有效性。

为此,本文采用了一种识别由STATCOM或SSSC限值引起的LIBP的方法。

1)通过判定 $\partial\lambda/\partial x_k$ 的符号变化(即PV曲线的切线斜率其符号变化与否)来确定PV曲线是否穿越了电压崩溃点^[14]。即当连续2个解 (x_n, λ_n) 和 (x_{n+1}, λ_{n+1}) 满足下式时,即判定曲线已经穿越了崩溃点,并且崩溃点就在 (x_n, λ_n) 和 (x_{n+1}, λ_{n+1}) 之间。

$$\begin{cases} \left. \frac{\partial\lambda}{\partial x_k} \right|_{(x_n, \lambda_n)} > 0 \\ \left. \frac{\partial\lambda}{\partial x_k} \right|_{(x_{n+1}, \lambda_{n+1})} < 0 \end{cases} \quad (17)$$

2)通过判定在崩溃点前后STATCOM或SSSC的控制方式切换情况来判断是SNBP还是LIBP。用 $M_{stV}(x, \lambda)$ 来表示STATCOM中处于定 V_i 控制方式的数量。如果在崩溃点前后满足:

$$M_{stV}(x_n, \lambda_n) = M_{stV}(x_{n+1}, \lambda_{n+1}) \quad (18)$$

那么就可以判定所求的崩溃点是SNBP;如果在崩溃点前后满足:

$$M_{stV}(x_n, \lambda_n) - M_{stV}(x_{n+1}, \lambda_{n+1}) = 1 \quad (19)$$

那么就可以判定所求的崩溃点是LIBP,且在崩溃点前后发生转换的那个STATCOM的 V_{sh} 或 I_{sh} 约束就是造成系统发生电压崩溃的关键约束。

类似的判定原理也适用于由SSSC控制方式切换引起的电压崩溃点的识别。

4 算例分析

为了验证本文方法的正确性和有效性,在IEEE 30节点、118节点标准系统的基础上改进添加了STATCOM和SSSC设备,并进行了验证。

对于IEEE 30节点系统,将STATCOM并联在母线12上得STATCOM在定 V_i 和定 Q_{sh} 控制方式下的崩溃点统计如表1所示。

表1 系统在安装STATCOM前后的崩溃点比较
Tab.1 Collapse point comparison with or without installing STATCOM

系统	控制方式	$\frac{1}{Z_{se}}$	给定量 (标么值)	裕度/ MW
IEEE 30 节点	定 V_i 方式	0.017 5+j0.135	1.05	252.8
	定 Q_{sh} 方式	0.017 5+j0.135	-1.50	234.1
	标准系统(无STATCOM)			148.5
IEEE 118 节点	定 V_i 方式	0.017 5+j0.185	1.05	4 262.2
	定 Q_{sh} 方式	0.017 5+j0.185	-1.20	4 174.2
	标准系统(无STATCOM)			3 968.8

由表1可知,IEEE 30节点系统的负荷裕度从148.5 MW扩展为234.1 MW和252.8 MW;IEEE 118节点系统则从3 968.8 MW变为4 174.2 MW和4 262.2 MW。安装STATCOM前后系统的电压稳定性有明显改善。

对于含SSSC的混合电力系统也作上述类似的连续潮流计算和比较。其中,对于IEEE 30节点系统将SSSC串联安装在15-12支路上;对于IEEE 118节点系统将SSSC串联安装在11-5支路上,其他具体参数见表2。

表2 系统在安装SSSC前后的崩溃点比较
Tab.2 Collapse point comparison with or without installing SSSC

系统	控制方式	$\frac{1}{Z_{se}}$	给定量 (标么值)	裕度/ MW
IEEE 30 节点	定 P_{ji} 方式	0.017 5+j0.115	0.1	141.7
	标准系统(无SSSC)			148.5
IEEE 118 节点	定 P_{ji} 方式	0.087 5+j0.585	0.2	3 928.4
	标准系统(无SSSC)			3 968.8

从表2可以看出,SSSC对于系统的电压稳定裕度影响比较有限,甚至会使得系统的电压稳定裕度有所减小。这与其串联接入的安装方式有关,SSSC在实际中的运用主要还是通过与所在支路原有电抗相抵消来减小功率在传输过程中的损耗,从而增大电能传输距离。

为验证文中提出的处理STATCOM和SSSC控制参数越限的模式双向切换逻辑的有效性,对上述改进的IEEE 30节点系统作了数值验证。

从图3中可以看出, V_{sh} 有一部分数值在1.313

之上,有一部分数值在 1.313 之下。如把 V_{sh} 的上限值设定为 1.3,那么当曲线运行到图 3 中虚线以上时,STATCOM 将处于定 V_{sh} 状态;当曲线运行到虚线以下时,STATCOM 又将回到正常的定 V_i 状态。本文依此验证,如图 4 所示。

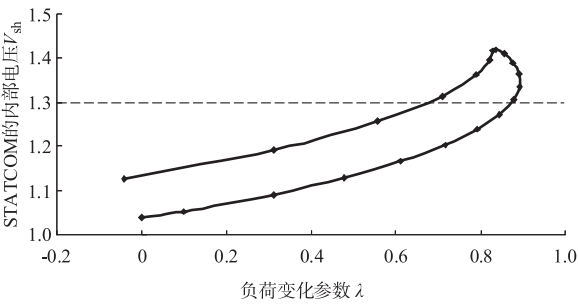


图 3 未计及 V_{sh} 越限时 STATCOM 的 PV 曲线
Fig.3 PV curve of STATCOM when V_{sh} is in limitation

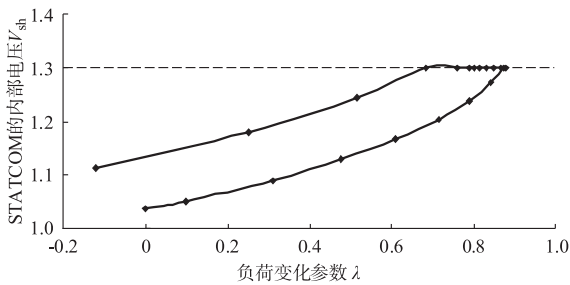


图 4 V_{sh} 越限时 STATCOM 的 PV 曲线
Fig.4 PV curve of STATCOM when V_{sh} is out of limitation

从图 3 和图 4 的对比中可以看出,当 V_{sh} 曲线到达 1.3 直至曲线回到 1.3 以下这部分的时候,STATCOM 都是被双向逻辑切换为定 V_{sh} 模式。在定 V_{sh} 模式下, V_{sh} 被固定为其上限值 1.3,图 4 中对应为虚线所在的水平段。在虚线以下部分图 3 和图 4 是一致的,也就是说双向转换逻辑在 V_{sh} 回到限值以内时可以有效地将 STATCOM 的控制方式切换回定 V_i 模式,避免了原有的一些控制方式转换逻辑只能单向转换的问题。

在 STATCOM 的其他控制方式情形以及 SSSC 上都可以用类似的处理来验证双向转换逻辑的有效性。

将原有的节点 12 上所连接的发电机的无功注入 Q_g 清零,同时在此节点上连接一个定 V_i 控制方式的 STATCOM,其给定的 V_i 即为原来节点 12 的发电机给定电压;考虑到本文图 1 模型中的 Q_{sh} 的流向与原有发电机的 Q_g 流向相反,因此只要将 Q_{sh} 的

下限提高即可引起 STATCOM 的 Q_{sh} 无功越限进而导致 LIBP。

从表 3 中可以看出,虽然原 IEEE 118 节点系统的崩溃点是 LIBP,但含 STATCOM 的 IEEE 118 节点系统的崩溃点已经变成了 SNBP。在将 STATCOM 的 Q_{sh} 下限提高以后,系统的崩溃点类型又回到了 LIBP,并且可以识别出导致系统出现 LIBP 的无功约束所在母线即为 STATCOM 所连接的那条母线。

表 3 STATCOM 引起的不同类型崩溃点的比较
Tab.3 Comparison of collapse point caused by STATCOM

控制方式	Q_{sh} 是否越限	裕度/MW	类型
含 STATCOM 的	是	586	LIBP
IEEE 118 节点系统	否	593	SNBP
标准 IEEE 118 节点系统		542	LIBP

5 结语

含 FACTS 元件的电力系统电压稳定评估是十分重要的。FACTS 元件在运行中由于其容量限制会发生控制模式的自动切换,如果在评估中不能正确处理,电压稳定评估的结果将不可信。本文采用交替迭代法结合连续潮流进行含 FACTS 元件的电压稳定评估。在计算过程中随负荷变化对 FACTS 元件内部控制模式进行切换。本文给出的控制模式双向转换逻辑以及临界点类型识别方法能够准确识别由于 FACTS 元件内部控制变量越限而引起的极限诱导分岔点。在此基础上,可结合灵敏度技术得到 FACTS 控制对于负荷裕度的灵敏度,从而得到相应的预防控制策略,这将是本文下一步的研究工作。对 IEEE 30 节点、118 节点标准系统的测试表明,本文所述方法适用于含 FACTS 元件大型混合电力系统的电压稳定评估计算。

参考文献

[1] 李建华,方万春,杜正春,等.含 HVDC 和 FACTS 装置的混合电力系统潮流计算方法[J]. 电网技术,2005,29(5):31-36.
LI Jianhua, FANG Wanchun, DU Zhengchun, et al. Calculation method of power system containing HVDC and FACTS[J]. Power System Technology, 2005, 29(5): 31-36.
[2] 黄春阳,赵慧春,黄顺礼. FACTS 设备的应用和发展前景[J]. 吉林电力,2002(3):23-25.
HUANG Chunyang, ZHAO Huichun, HUANG Shunli. Application and prospect of FACTS devices[J]. Jilin Electric Power, 2002(3): 23-25.
[3] CANIZARES C A, ALVARADO F L, DEMARCO C L, et al. Point of collapse methods applied to AC/DC power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(2): 673-683.
[4] 张彦魁,张焰,吴蓓,等. 包含多控制模式及运行极限的静止同步

- 串联补偿器建模[J]. 上海交通大学学报, 2006, 40(3): 44-49.
- ZHAN Yankui, ZHAN Yan, WU Pei, et al. The static modeling of static synchronous series compensator (SSSC) including multi-control modes and operating limits[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2006, 40(3): 44-49.
- [5] BIAN J, LEMAK T A, NELSON R J, et al. Power flow controller models for power system simulations[J]. Power System Technology, 1995, 19(9): 15-19.
- [6] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [7] 陈金富, 段献忠, 何仰赞. 计及 FACTS 元件的潮流计算[J]. 华中理工大学学报, 1997, 25(6): 80-82.
- CHEN Jinfu, DUAN Xianzhong, HE Yangzan. Power flow calculation with FACTS devices duly considered[J]. Journal of Huazhong University of Sci & Tech, 1997, 25(6): 80-82.
- [8] 于继来, 柳焯. 移相调节变压器特性的统一分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1994, 26(1): 42-46.
- YU Jilai, LIU Zhuo. Unified analysis of phase-shifting transformer character [J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 1994, 26(1): 42-46.
- [9] ZHANG Xiaoping. Flexible AC transmission systems modeling and control[M]. Germany: Springer, 2006.
- [10] ZHANG Xiaoping. Advanced modeling of the multicontrol functional static synchronous series compensator in Newton power flow[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1410-1416.
- [11] 段献忠, 陈金富, 李晓露, 等. 柔性交流输电系统的潮流计算[J]. 中国电机工程学报, 1998, 18(3): 195-199.
- DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu, LI Xiaolu, et al. Power flow calculation of flexible AC transmission systems [J]. Proceedings of the CSEE, 1998, 18(3): 195-199.
- [12] 刘崇茹. 交直流混合输电系统稳态运行特性及其调控研究[D]. 北京: 清华大学, 2006.
- [13] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 潮流计算中 PV-PQ 节点转换逻辑的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(1): 54-59.
- ZHAO Jinquan, CHIANG H D, ZHANG Boming. Study on PV-PQ bus type switching logic in power flow computation [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(1): 54-59.
- [14] 赵晋泉, 江晓东, 张伯明. 一种静态电压稳定临界点的识别和计算方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 28-32.
- ZHAO Jinquan, CHIANG H D, ZHANG Boming. Approach for identification and computation of static voltage stability critical point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 28-32.

赵晋泉(1972—), 男, 通信作者, 教授, 主要研究方向: 电力系统优化运行、静态稳定控制和电力市场。E-mail: jqzhao2@tom.com

孙晓明(1980—), 男, 助理工程师, 主要研究方向: 电力系统电压稳定分析与控制。

龚成明(1978—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 现代软件技术在电力系统网络分析中的应用。

Voltage Stability Assessment of a Hybrid Power System with FACTS Devices

ZHAO Jinquan¹, SUN Xiaoming¹, GONG Chengming², YANG Zhihong²

(1. Research Center for Renewable Energy Generation Engineering, MOE, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. NARI Technology Development Co. Ltd., Nanjing 210061, China)

Abstract: Flexible AC transmission system (FACTS) devices such as static synchronous compensator (STATCOM) and static synchronous series compensator (SSSC) have been used in real power grids. The voltage stability assessment of a hybrid power system with FACTS is important. Based on the source-impedance models of STATCOM and SSSC, the load flow model of a power system with STATCOM and SSSC is developed. The alternative-iteration method embedded into Newton power flow method is used to solve this problem. A double switching logic is proposed for handling the operation constraints of STATCOM and SSSC. A continuation power flow method considering FACTS is presented for calculating the load margins and voltage stability critical points. An identification scheme of saddle node bifurcation point (SNBP) and limit induced bifurcation point (LIBP) induced by the operation limits of STATCOM and SSSC is also given. The numerical results on IEEE 30-bus and IEEE 118-bus test systems show that the method proposed is efficient and suitable for voltage stability assessment of power systems with FACTS devices.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50607003, No. 51077042), National Key Technology Research and Development Program of China (No. 2008BAA13B06).

Key words: voltage stability assessment; continuation power flow; static synchronous compensator (STATCOM); static synchronous series compensator (SSSC); double switching logic; limit induced bifurcation point (LIBP)