

连接低惯量系统的 VSC-MTDC 的自适应下垂控制

翟冬玲¹, 韩民晓¹, 马骏鹏¹, 王 鹏²

(1. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206;

2. 中国电力工程顾问集团新能源有限公司, 北京 100120)

摘要:对于连接低惯量交流系统的多端柔性直流输电(VSC-MTDC)系统,当系统发生大扰动时会造成频率变化,为了给交流系统提供虚拟惯量,在换流器控制系统中加入 P - f 下垂控制;为了进一步抑制频率波动,设计VSC-MTDC系统的自适应下垂控制,可以在更大程度上利用换流器容量,快速调节有功平衡,减小直流电压波动。在PSCAD/EMTDC仿真软件中建立三端模型,对比分析主从控制、下垂控制和自适应下垂控制对交流系统频率和直流电压的影响。仿真结果表明,加入了 P - f 下垂控制可以有效抑制交流系统频率变化,采用自适应下垂控制可以增强抑制的效果,减小直流电压波动,提高系统稳定性。

关键词:低惯量系统;多端柔性直流输电;自适应下垂控制;稳定性

中图分类号:TM 721.1

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.02.019

0 引言

随着新能源的不断接入,传统机组与新能源机组共同构成了复杂的能源基地,系统的惯性水平降低。我国风电81%分布在“三北”地区,当地负荷电能消纳较小,需将能源远距离外送,直流输电是最可行的输送方式。由于我国直流电网在不断发展,新建的直流端可取落点于已建的直流输电系统,形成多端直流输电的运行方式。与多条两端直流相比,多端柔性直流输电(VSC-MTDC)更经济,效率也更高。直流系统能够解耦各端交流系统,使得低惯量系统失去电网的支持。当弱系统的频率超出规定值时,会对机组造成损坏,若采取切机的方式,则不利于经济运行^[1]。

目前,已有很多文献对VSC-MTDC系统进行了研究,常用的3种多端直流系统的控制方法为主从控制、裕度控制和下垂控制^[2]。其中主从控制需要集中通信系统而不适用于远距离输电。裕度控制和下垂控制可以分散控制^[3]。裕度控制是主从控制的扩展,一端需要作为主控制器控制直流电压,但当系统参数发生变化时,另一端会作为新的主控制器,在这个转换过程中,系统会发生振荡^[4]。文献[5-6]针对风电场经VSC-HVDC送出到低惯量系统的情况,直流控制系统采用了典型的双环PI控制,并提出了利用直流电容中的能量的充放,构成电压源型换流器(VSC)的虚拟惯量,从而增强系统有效惯量,但由

于直流电容的容量有限,且直流电压的调节裕度较小,所以这种方式可提供的惯量也很小。文献[1]在文献[6]的基础上,提出根据受端系统频率的变化改变送端风电场的输出功率,使送端风电场也可以提供部分虚拟惯量,从而提高系统强度。但此时,为了提供虚拟惯量,风电场并未运行在最大功率点跟踪的情况下。文献[7]利用直流系统与另一端电网的功率交换控制对系统惯量进行补偿。文献[8]也对低惯量系统进行了虚拟惯量的研究。上述文献采用的很多方法都利用了直流系统传输功率的调制对系统电磁功率进行补偿,从而减小系统频率的变化,提高系统的有效惯量,但已有研究大多针对受端电网是低惯量系统且都仅限于两端直流系统的情况。文献[4]根据换流器的容量设计下垂系数,使得系统能够最大效率利用换流器并使其不超荷。文献[9]通过在下垂系数中引入功率因子,从而提高电压质量。文献[10]利用一致性算法,对多端系统的潮流进行优化。文献[11]提出了基于下垂控制的自动修正功率参考值的方法,但并没有改变下垂控制系数。文献[12]考虑了减小系统铜损设计下垂系数,并考虑了换流器的容量,但没有对减小直流电压波动进行分析。文献[13]基于模块化多电平换流器(MMC)的直流内电势设计了新型下垂控制策略,文献[14]针对连接新能源的多端直流系统,设计了带电压和功率死区的下垂控制,但文献[13-14]中下垂控制系数是固定的。

本文主要针对VSC-MTDC系统中一端电网为低惯量交流系统的情况,研究适用于此类VSC-MTDC的下垂控制策略,分析控制策略对交流系统频率和直流电压变化的作用以及功率在各个端子之间的平衡,并在PSCAD/EMTDC仿真软件中建立仿真模型,验证提出的下垂控制策略应用于直流控制系统的有效性以及其在大扰动情况下对交流系统频率和直流

收稿日期:2018-04-30;修回日期:2018-11-28

基金项目:国家重点研发计划智能电网技术与装备重点专项(2016YFB0900600);国家留学基金委资助项目(2017067-30048)

Project supported by the National Key R&D Program of Smart Grid and Equipment of China (2016YFB0900600) and China Scholarship Council Program (201706730048)

电压的抑制作用。

1 多端系统的模型

本文建立了并联三端 VSC-MTDC 系统,送端为由新能源、传统机组和负荷构成的低惯量区域电网,另外两端为受端电网,其结构如图 1 所示。

1.1 低惯量区域电网

送端低惯量交流系统的电源由传统发电机组和新能源机组共同组成,在发生大扰动情况下,系统频率变化较大,会影响机组的寿命和系统稳定性。对于同步发电机,其转子运动方程如下:

$$\frac{2H_s S_s}{f_0} \frac{df}{dt} = P_m - P_e \quad (1)$$

其中, H_s 为同步电机的惯性时间常数; f 为发电机频率; f_0 为额定频率; P_m 为同步发电机的机械功率; P_e 为同步发电机的电磁功率; S_s 为发电机的额定容量。

如果交流系统的惯性时间常数小,当功率发生不平衡时,频率变化就会较大。电力系统允许的最低频率受安全运行的限制,以及可能发生“频率崩溃”或“电压崩溃”的限制。对于高温高压参数下的火电厂,在频率低于 46~46.5 Hz 时,就有“电压崩溃的风险”。

1.2 换流器模型

图 2 为 VSC-MTDC 的送端换流器的等效电路图。图中 f_1 为送端系统的频率, U_{s1} 为送端系统交流电压, U_{c1} 为换流器交流侧电压, i_{s1} 为交流电源的输出电流, i_1 为输入换流器的交流电流, R_1 和 L_1 分别为整流器交流侧等效电阻和电感, Z_L 为送端负荷的等效阻抗, P_1 和 Q_1 分别为送端系统输入直流系统的有功和无功功率。

根据功率平衡,有:

$$P_e = P_L + P_1 \quad (2)$$

其中, P_L 为负荷有功功率。

可以列写出三相坐标系下送端系统 VSC 的数学模型为:

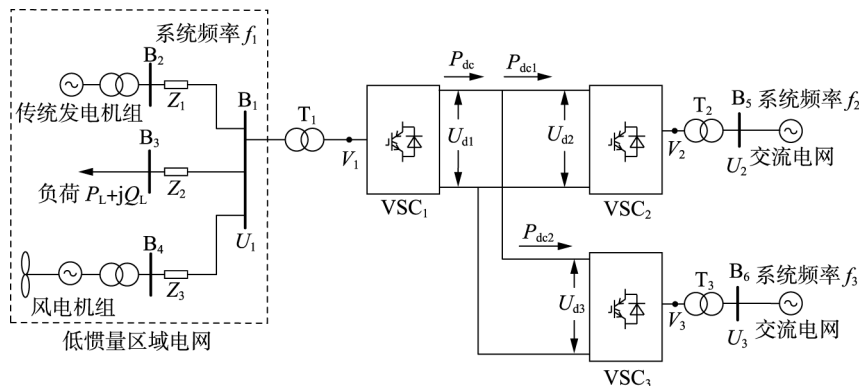


图 1 低惯量系统经 VSC-MTDC 送出结构图

Fig.1 Structure diagram of low inertia system sending via VSC-MTDC

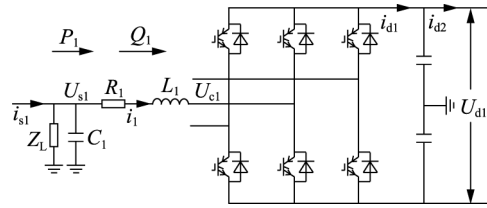


图 2 送端低惯量系统等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of low inertia system at sending side

$$\begin{cases} L_1 \frac{di_{s1}}{dt} = U_{s1} - U_{c1} - R_1 i_1 \\ C_1 \frac{dU_{s1}}{dt} = i_{s1} - i_1 - i_L \end{cases} \quad (3)$$

其中, i_L 为负荷电流。

换流器底层控制采用经典的直流电流控制方式,在 dq 旋转坐标系下,分别控制有功分量和无功分量,通过内环电流控制器,输出电压调制信号。外环控制器采用的有功分量为有功功率,无功分量为交流电压,控制器框图如图 3 所示。受端换流器的数学模型和控制原理同整流侧换流器。

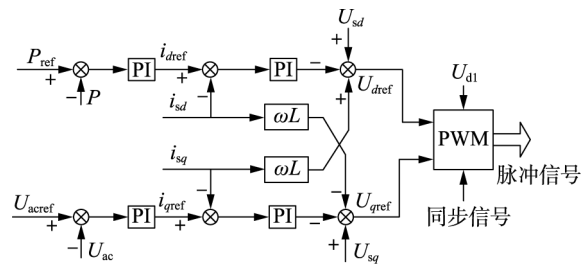


图 3 控制器框图

Fig.3 Block diagram of controller

2 VSC-MTDC 的下垂控制

多端系统的下垂控制为直流系统的上层控制,决定着功率在各个换流站之间的分配情况。上层控制根据系统运行状态和各个换流站的参数,设置各个换流站的下垂系数,有功功率根据下垂系数在换流站间流动。传统的下垂控制系数建立了直流电压

和有功功率或电流之间的关系,本文考虑的是送端系统为低惯量交流系统的情况,通过建立频率和有功功率之间的下垂系数调节送端系统的频率变化。

2.1 受端换流器的下垂控制

在设计下垂系数时,要考虑系统须运行在约束条件内,包括以下几个方面。

a. 直流电压等级。直流电压的上限由开关器件的绝缘水平决定,下限是基于调制的限制、换流器的拓扑结构和控制系统而设置的^[15]。多端直流输电系统直流电压偏差通常限定在 $\pm 10\%$ 以内。

b. 换流器容量,由换流器中的器件电流决定。

c. 直流电流限制。其与相连的直流器件的额定电流有关,且直流电压下限值比直流电流限值更易达到。

根据以上分析,可以得到受端换流器下垂控制的运行区间如图 4 所示。图中有功功率、电压均为标么值。

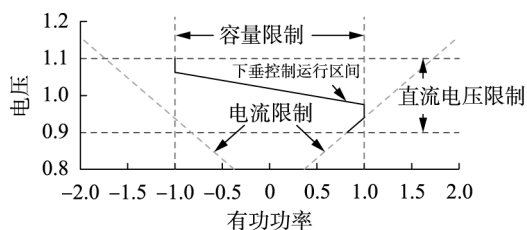


图 4 换流器下垂控制的运行区间

Fig.4 Operating range of droop control for converter

系统在运行时,系统功率要保持平衡。当功率不平衡时,功率偏差由各个换流站共同承担。各个端子流向直流系统的有功功率应与系统有功功率损耗 P_{loss} 的总和为 0,如式(4)所示。

$$\sum_{i=1}^n P_i + P_{\text{loss}} = 0 \quad (4)$$

其中, n 为端子数。

功率方向以流向直流系统为正。当系统功率不平衡时,直流电压会发生变化,根据下垂系数,控制系统会调节换流站间的有功功率参考值,直到达到平衡。受端换流器的电压偏差 ΔU_{dc} 与输入直流系统的有功功率的偏差 ΔP 的关系为:

$$\Delta U_{\text{dc}} = -k_{v_i} \Delta P \quad i=1,2 \quad (5)$$

其中, k_{v_i} 为下垂系数,可根据各个换流站的容量来选取。当电压升高时,需要减小有功功率;当电压下降时,应增加有功功率。

2.2 送端换流器的 P - f 下垂控制

对于送端低惯量弱系统,当电磁功率与机械功率不平衡时,转子转速会发生变化,频率也随即发生改变。为了抑制频率的变化,可以利用整流器的动态性能,平衡交流系统功率差额,降低交流系统频率变化的影响。本文利用 P - f 曲线的概念建立交流系统频率和换流器输出功率的自适应调节关系(根据

功率流动方向,本文中曲线 P - f 的斜率为正数),如图 5 所示。图 5 中, P_{max} 和 P_{min} 为换流器容量的限值, $P_{\text{min}} = -P_N$, $P_{\text{max}} = P_N$, P_N 为换流器的额定容量; f_{max} 为交流系统频率的上限值; f_{min} 为交流系统频率的下限值; P_0 和 f_0 分别为初始稳定运行状态下的有功功率和频率,其中 $f_0 = 1$ p.u.。为了不越限运行,换流器的 P - f 只能运行在阴影部分。送端换流器的有功功率偏差 ΔP 和频率偏差 Δf 的关系式如下:

$$\Delta f = k_s \Delta P \quad (6)$$

其中, k_s 为送端换流器 ΔP 和 Δf 的比例系数。

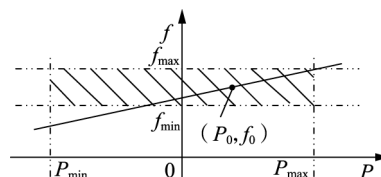


图 5 送端换流器 P - f 曲线

Fig.5 P - f curve of converter at sending side

假设 H_p 为送端换流器有功功率调制可以提供的虚拟惯量, S_{c1} 为 VSC₁ 的容量, P' 为 VSC₁ 发生扰动后 VSC₁ 输出的有功功率,可以列写出:

$$2H_p S_{c1} \frac{df}{dt} = P' - P_0 = \frac{1}{k_s} \Delta f \quad (7)$$

在时间 Δt 内,对式(7)两端积分,得到:

$$H_p = \frac{1}{k_s} \frac{\Delta t}{2S_{c1}} \quad (8)$$

应根据换流器的容量和频率允许阈值范围选取下垂系数 k_s ,同时从式(8)中可以看出送端换流器提供的虚拟惯量 H_p 与时间的关系, k_s 值越小,提供的虚拟惯量 H_p 越大,但系统的惯性越大也意味着系统的动态反应时间越长,不利于系统恢复。当送端弱系统发生大扰动时,频率发生变化,送端换流器可以通过调节自身的功率输出为送端弱交流系统提供虚拟惯量,与送端交流系统进行动态调节共同抑制频率的变化。

3 下垂系数的自适应调节

为了能够最大限度地利用换流器容量调节功率的不平衡,减小交流系统频率和直流电压的变化,考虑用非线性的比例系数替代线性的比例系数。非线性的系数应根据换流器的容量限制和电压限制来选取,同时应考虑惯性常数不应太大,还可有效增强发生大扰动时对频率和直流电压波动的抑制效果。

3.1 送端换流器的自适应 P - f 下垂控制

在运行区间内,用非线性的比例系数替代线性的比例系数,最大限度地利用换流器的容量,动态调节运行点,减小频率变化的幅度,增强系统稳定性。如上文所述, k_s 为连接弱系统端的换流器控制系统

的下垂系数,其取值设计为:

$$k_s = \sqrt{(f - f_0) m_f} \quad (9)$$

$$m_f = \begin{cases} \frac{f_{\max} - f_0}{(P_{\max} - P_0)^2} & \Delta f > 0 \\ \frac{f_{\min} - f_0}{(P_{\min} - P_0)^2} & \Delta f \leq 0 \end{cases} \quad (10)$$

根据式(9)和式(10),可以作出下垂系数自适应调节关系曲线,如图6所示。

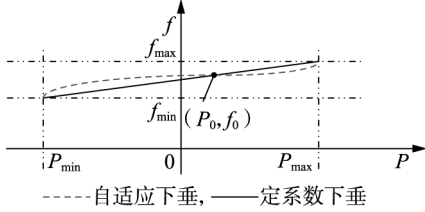


图6 连接弱系统的换流器的下垂系数曲线
Fig.6 Curve of droop coefficient for converter connected to weak system

从图6中可以看出,当频率出现偏差时,曲线斜率相比线性系数更小,换流器的控制系统能够更加充分利用换流器自身的容量,调节有功功率输出,并运行在限值内,提高了功率调节的能力,可以在更大程度上抑制交流侧的频率波动。连接弱系统的换流器的自适应控制框图如图7所示。

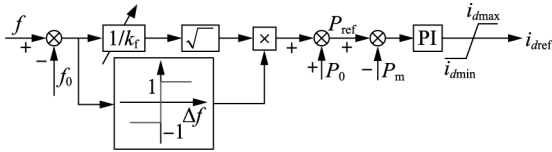


图7 连接弱系统的换流器的自适应控制框图
Fig.7 Adaptive control block diagram of converter connected to weak system

3.2 受端换流器的自适应下垂控制

若送端的有功功率偏差和频率偏差之间的系数为自适应调节,当交流系统频率发生变化时,送端换流器调节输入直流系统的有功功率,直流电压会发生波动。为了减小电压波动,有功功率偏差和直流电压偏差之间的下垂系数也引入自适应调节,使得受端系统也可以有效利用自身换流器的容量,动态调节运行点,平衡系统有功功率。

换流器控制系统的自适应下垂系数取值设计为:

$$k_v = \sqrt{(U_{dc} - U_0) m_v} \quad (11)$$

$$m_v = \begin{cases} \frac{U_{dc\max} - U_0}{(P_{\min} - P_0)^2} & \Delta U_{dc} > 0 \\ \frac{U_{dc\min} - U_0}{(P_{\max} - P_0)^2} & \Delta U_{dc} \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, k_v 为换流器控制系统的下垂系数; U_{dc} 为直流电压; $U_{dc\max}$ 和 $U_{dc\min}$ 为直流电压的限值; U_0 为初始值。

当电压出现偏差时,各个换流站需要根据下垂

系数调节有功功率输出,受端换流器的下垂系数曲线如图8所示。从图8中可以看出,系统可以运行在电压和容量的限制范围内的同时尽可能高效地利用换流器的容量。受端系统换流器的自适应控制框图如图9所示。对于直流系统,当送端系统的频率发生变化时,送端会向直流系统输入 ΔP 的有功功率,设采用定下垂系数的直流系统会产生 ΔU_{dc1} 的直流电压波动,而采用自适应下垂系数的直流系统的直流电压波动为 ΔU_{dc2} ,且有:

$$\Delta U_{dc1} - \Delta U_{dc2} = (-k_{v1} + k_{v2}) \Delta P \quad (13)$$

其中, k_{v1} 为下垂控制的系数; k_{v2} 为本文提出的自适应控制的下垂系数。

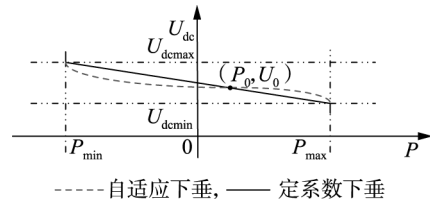


图8 受端换流器的下垂系数曲线

Fig.8 Curve of droop coefficient for converter at receiving side

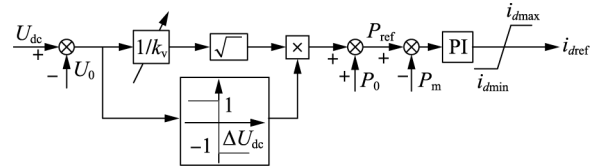


图9 受端系统换流器的自适应控制框图

Fig.9 Adaptive control block diagram of converter at receiving side

将式(11)代入式(13)可以证明,式(13)恒小于等于0,即对于同样的有功功率波动,采用自适应下垂控制时直流电压波动更小。也可以从图8所示的自适应下垂控制曲线中看出,对于同样的有功功率不平衡,自适应下垂控制的曲线在定系数下垂控制的曲线之外,当采用自适应下垂控制后,直流电压波动更小。

4 仿真分析

为了验证本文所提控制方法对交流系统频率和直流电压波动抑制的有效性以及多端系统的有功功率平衡,在PSCAD/EMTDC软件中搭建了如图1所示的三端VSC-MTDC测试系统。其中,送端低惯量交流系统由七阶的同步发电机模拟,VSC₁为送端换流器,VSC₂和VSC₃为受端换流器。直流系统的仿真参数如附录中表A1所示,同步发电机的仿真参数如附录中表A2所示。

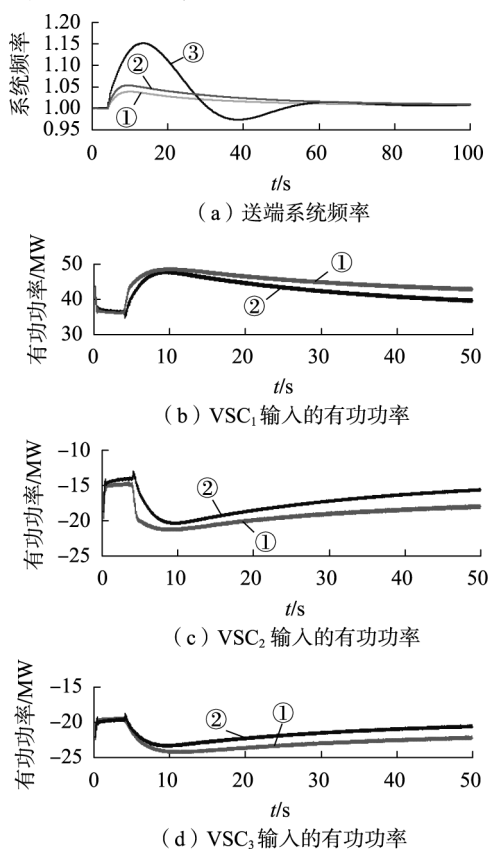
为了研究VSC-MTDC一端为低惯量交流系统在大扰动情况下,本文提出的自适应下垂控制对交流系统频率波动的抑制作用,对负荷突增和突减2种

情况进行了仿真分析,并与下垂控制和主从控制进行了对比分析。主从控制中, VSC_1 、 VSC_3 采用定有功功率控制, VSC_2 采用定直流电压控制。根据换流器的容量,取送端换流器的功率频率下垂控制系数为 0.004, VSC_2 的下垂系数为 0.04, VSC_3 的下垂系数为 0.1。主从控制、下垂控制与自适应下垂控制的稳定运行点是一致的,取向直流系统输入功率方向为正, VSC_1 的有功功率参考值为 40 MW, VSC_2 的有功功率参考值为 -15 MW, VSC_3 的有功功率参考值为 -20 MW。当系统发生扰动时,不同的控制方法会根据自身的控制原理进行调节,使系统达到新的平衡点。

4.1 交流频率抑制和功率平衡

4.1.1 算例 1: 系统正常运行时发生负荷突减

当系统稳定运行到 4 s 时,负荷有功功率由 50 MW 降低至 30 MW,无功功率由 5 Mvar 降低至 2 Mvar,得到的仿真结果如图 10 所示。图中,系统频率为标么值,后同。从图 10(a)中可以看出,当低惯量系统发生负荷突减扰动时,系统频率会上升,若连接的多端直流系统采用的是主从控制策略,交流系统的频率变化较大,对系统的运行造成了威胁;若采用下垂控制,在换流器控制系统中引入 $P-f$ 下垂控制后,能够为交流系统提供虚拟惯量,抑制频率波动的幅值,且效果显著;而采取了自适应下垂控制的系



①自适应下垂控制, ②下垂控制, ③主从控制

图 10 负荷突减时的仿真结果

Fig.10 Simulative results when load suddenly decreases

统可以进一步抑制交流系统频率的变化,提高系统的稳定性。从图 10(b)—(d)中可以看出,当系统有功功率不平衡时,采用自适应下垂控制时有功功率变化比较快,能更大程度上利用自身的容量,在短时间内有更多的功率来配合调节系统的功率不平衡。

4.1.2 算例 2: 系统正常运行时发生负荷突增

当系统稳定运行到 4 s 时,负荷有功功率由 50 MW 突增至 70 MW,无功功率由 5 Mvar 突增至 7 Mvar,得到的仿真结果如图 11 所示。从图 11(a)中可以看出,当低惯量交流系统侧发生负荷突增时,低惯量交流系统的频率会减小,采用主从控制的多端直流输电系统交流侧频率跌落情况比较严重,而采用了 $P-f$ 下垂控制的直流输电系统可以为弱交流系统提供虚拟惯量,有效抑制了系统频率的减小,采用自适应下垂控制可以进一步抑制频率的下降,提升系统的稳定性。从图 11(b)—(d)中可以看出,采用了自适应下垂控制的多端直流输电系统在系统发生大扰动的情况下,有功功率调节速度更快,使得功率可以达到新的运行点。

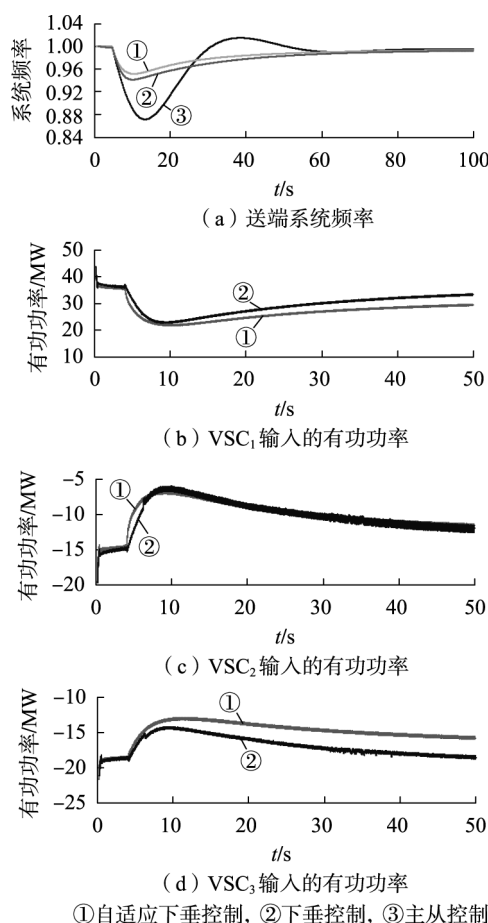


图 11 负荷突增时的仿真结果

Fig.11 Simulative results when load suddenly increases

4.2 直流电压波动的抑制

为了验证受端换流器采用自适应下垂控制对直流电压波动的抑制作用,对受端换流器采用定系数

和自适应下垂系数2种控制方式进行了建模仿真对比。分别针对负荷突增和负荷突减2种大扰动情况,对比直流电压波动的百分比,得到的结果如表1和表2所示。当送端交流系统的频率发生波动时,送端换流站输入直流系统的有功功率会发生改变,有功功率偏差需要受端换流站平衡,从表1和表2中可以看出,采用自适应下垂控制时的直流电压波动与定系数下垂控制相比,大幅减小了波动值,降低了直流系统绝缘水平的要求,提高了抗扰动的能力。

表1 负荷突减时直流电压波动百分比

Table 1 Fluctuation percentage of DC voltage when load suddenly decreases

控制方法	直流电压波动/%			
	10 MW	20 MW	30 MW	40 MW
定系数下垂控制	0.653 1	1.172 7	1.276 1	1.419 8
自适应下垂控制	0.071 5	0.115 1	0.120 3	0.124 1

表2 负荷突增时直流电压波动百分比

Table 2 Fluctuation percentage of DC voltage when load suddenly increases

控制方法	直流电压波动/%			
	10 MW	20 MW	30 MW	40 MW
定系数下垂控制	1.210 8	2.030 5	2.514 0	3.656 1
自适应下垂控制	0.177 6	0.373 5	0.590 5	0.825 0

5 结论

本文基于一端为低惯量交流系统的三端VSC-MTDC系统,做了以下的研究:

a. 针对连接低惯量交流系统的换流器,提出 P - f 下垂控制,其可以为低惯量系统提供虚拟惯量,提高交流系统的稳定性;

b. 提出适用于送端为低惯量交流系统的三端VSC-MTDC系统的自适应下垂控制,可以最大限度地利用换流器容量,在低惯量交流系统发生大扰动时加快调整系统的功率流动,抑制频率和直流电压的波动,使系统保持稳定运行;

c. 在PSCAD/EMTDC仿真软件中对本文所述的三端VSC-MTDC系统进行了建模,并针对大扰动情况,对比分析了主从控制、下垂控制、自适应下垂控制3种控制方法对频率波动的抑制作用,并进行了受端换流器采取定下垂系数和自适应下垂系数时直流电压波动的仿真对比,可见加入了 P - f 下垂控制的直流系统可以为交流系统提供虚拟惯量,有效抑制系统的频率波动,而采用自适应下垂控制可以进一步减小系统频率变化,降低直流电压波动,提升系统稳定性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 李宇骏,杨勇,李颖毅,等. 提高电力系统惯性水平的风电场和VSC-HVDC协同控制策略[J]. 中国电机工程学报,2014,34

(34):6021-6031.

LI Yujun, YANG Yong, LI Yingyi, et al. Coordinated control of wind farms and VSC-HVDC to improve inertia level of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6021-6031.

[2] 付媛,王毅,张祥宇,等. 多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):130-136.

FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Coordinated power control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 130-136.

[3] 陈谦,唐国庆,潘诗锋. 采用多点直流电压控制方式的VSC多端直流输电系统[J]. 电力自动化设备,2004,24(5):10-15.

CHEN Qian, TANG Guoqing, PAN Shifeng. VSC-MTDC using multi-terminal DC voltage control scheme[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5): 10-15.

[4] 刘瑜超,武健,刘怀远,等. 基于自适应下垂调节的VSC-MTDC功率协调控制[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):40-48.

LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.

[5] 张武其,吕洋. 向弱电网供电的VSC-HVDC系统的模拟惯量控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制,2016,44(6):104-110.

ZHANG Wuqi, LÜ Yang. Emulation inertia control strategy for VSC-HVDC supplying weak network[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 104-110.

[6] ZHU J, BOOTH C D, ADAM G P, et al. Inertia emulation control strategy for VSC-HVDC transmission systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1277-1287.

[7] 鲍正杰,李生虎. 基于VSC-HVDC有功支援和自适应低频减载的区域电网频率控制[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(20):32-37.

BAO Zhengjie, LI Shenghu. Frequency control for regional system based on active power support from VSC-HVDC and adaptive under-frequency load shedding[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 32-37.

[8] CASTRO L M, ACHA E. On the provision of frequency regulation in low inertia AC grids using HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2680-2690.

[9] 罗永捷,李耀华,王平,等. 多端柔性直流输电系统直流电压自适应下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(10):2588-2599.

LUO Yongjie, LI Yaohua, WANG Ping, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal HVDC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(10): 2588-2599.

[10] 韩民晓,许冬,万磊. 基于一致性算法的混合多端直流自律分散控制[J]. 电力系统自动化,2016,40(12):130-136.

HAN Minxiao, XU Dong, WAN Lei. Consensus algorithm based decentralized autonomous control of hybrid multi-terminal direct current system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 130-136.

[11] 喻锋,王西田,解大. 多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(11):117-122.

YU Feng, WANG Xitian, XIE Da. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 117-122.

[12] 冉晓洪,苗世洪,吴英杰,等. 基于最优功率分配的多端直流网络改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报,2016,31(9):16-24.

RAN Xiaohong, MIAO Shihong, WU Yingjie, et al. An improved droop control strategy for multi-terminal DC grids based on optimal active power allocation[J]. Transactions of China Electrotechnical

- Society, 2016, 31(9): 16-24.
- [13] 杨文博, 宋强, 朱喆, 等. 基于直流内电势控制的 MMC 多端直流输电系统最优下垂控制[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(10): 51-59.
- YANG Wenbo, SONG Qiang, ZHU Zhe, et al. Optimal droop control based on direct DC internal potential control for MMC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10): 51-59.
- [14] 李文勋, 车延博, 洪潮, 等. 考虑输电损耗和新能源波动的 VSC-MTDC 下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 220-226.
- LI Wenxun, CHE Yanbo, HONG Chao, et al. VSC-MTDC droop control strategy considering transmission loss and renewable energy fluctuation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 220-226.
- [15] VRANA T K, BEERTEN J, BELMANS R, et al. A classification of

DC node voltage control methods for HVDC grids[J]. Electric power systems research, 2013, 103: 137-144.

作者简介:



翟冬玲

翟冬玲(1989—),女,黑龙江佳木斯人,博士研究生,主要研究方向为高压直流输电及系统稳定性(E-mail: zhaidongling@ncepu.edu.cn);

韩民晓(1963—),男,陕西西安人,教授,博士,主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用等(E-mail: hanminxiao@263.net);

马骏鹏(1993—),男,山东潍坊人,硕士研究生,主要研究方向为高压直流输电(E-mail: majunpeng9311@163.com)。

Adaptive droop control of VSC-MTDC connected to low inertia system

ZHAI Dongling¹, HAN Minxiao¹, MA Junpeng¹, WANG Peng²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. New Energies Sources Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China)

Abstract: As for the VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current) system connected to low inertia AC system, the frequency of the system may fluctuate when large disturbances happen. Therefore, the P - f droop control is introduced in the converter control to supply virtual inertia for AC system. In order to further suppress the frequency fluctuation, an adaptive droop control for VSC-MTDC is designed. This control method can take advantages of converter capacity to a large extent, adjust active power quickly and reduce DC voltage variation. Additionally, a three-terminal model is built in the PSCAD/EMTDC software to compare and analyze the impacts on frequency and DC voltage of master-slave control, P - f droop control and adaptive droop control. The simulative results show that the droop control based on P - f curve can suppress the frequency fluctuation effectively and the adaptive droop control can reinforce the suppression effect and decrease the voltage variation so as to improve the power system stability.

Key words: low inertia system; VSC-MTDC power transmission; adaptive droop control; stability

(上接第 127 页 continued from page 127)

Directional adjustment strategy for equivalent generator output based on power sensitivity

XIA Chengjun¹, HUA Xia¹, LI Qing²

(1. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Maintenance & Test Center, CSG EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: The initial power angle is not consistent before and after equivalence due to the variation of balancing machine output. To address this problem, the reason for the variation of balancing machine output and the mechanism of power angle deviation are analyzed. A directional adjustment strategy of equivalent generator output based on power sensitivity is presented. Based on the power flow control constraints for transmission lines and the ramping constraints for generators, the power adjustment of the control node is determined. According to the magnitude of the sensitivity and the line power flow deviation, the selection approach for control nodes is proposed. The line power flow deviation before and after the equivalent is controlled within the required range considering the determination of control nodes and the adjustment quantity. The power angle deviation of the balancing machine can be eliminated using directional adjustment of equivalent generator output. The corresponding adjustment steps and strategy process are also discussed. The effectiveness of the adjustment strategy is verified by the case of the annual data of China Southern Power Grid.

Key words: dynamic equivalence; initial power angle deviation; power sensitivity; adjustment strategy; electric power systems

附 录

表 1 测试系统主要参数

Table 1 Parameters for the test system

参数	数值
直流电压/kV	24
基准交流电压/kV	13.8
VSC ₁ 额定有功容量/MW	80
VSC ₂ 额定有功容量/MW	75
VSC ₃ 额定有功容量/MW	45
直流电容/ μ F	100
交流电感/mH	1

表 2 同步发电机主要参数

Table 2 Parameters for the SG

参数	数值
额定容量/MW	90
机端电压/kV	13.8
惯性时间常数/s	3.17
x_d, x_d', x_d'' /pu	1.014, 0.314, 0.28
x_q, x_q', x_q'', x_1 /pu	0.77, 0.375, 0.15
T_d, T_d', T_q'' /s	6.55, 0.039, 0.071
原动机调差系数/pu	0.04
原动机时间常数/s	2.0
伺服电机时间常数/s	0.05
励磁调节器增益/pu	400
励磁时间常数/s	0.02