

含整流站接入的多馈入直流系统强度评估

陈修宇¹, 韩民晓¹, 刘崇茹¹, Ani. M. Gole²

(1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206

2. 曼尼托巴大学电气与计算机工程系, 加拿大 温尼伯 R3T 5V6)

System Strength Evaluation of Multi-infeed HVDC System Integrated With Rectifier Stations

CHEN Xiuyu¹, HAN Minxiao¹, LIU Chongru¹, Ani. M. Gole²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg R3T 5V6, Canada)

ABSTRACT: The existing definition of the multi-infeed effective short circuit ratio (MIESCR) fails to depict the system strength of the multi-infeed system with rectifier stations integrated. To represent this feature, it should be modified. The dual-infeed HVDC test system with the rectifier station connected was established in the work. Based on the maximum power stability curve method, the new definition of multi-infeed effective short circuit ratio was proposed after conducting a range of parametric studies. Using the inverter/rectifier mixed triple-infeed systems in the critical stability and the transient overvoltage (TOV) calculation of the inverter, the effectiveness of the new MIESCR definition was verified.

KEY WORDS: HVDC transmission; multi-infeed system; multi-infeed interaction factor; multi-infeed effective short circuit ratio; transient overvoltage; voltage interaction

摘要: 现有的多馈入短路比的定义无法准确描述含有整流站接入的多馈入系统强度, 需要对其进行改进。建立了含有整流站的双馈入测试系统, 采用最大功率曲线法, 在一系列参数研究的基础上提出了新的多馈入系统有效短路比的定义。通过对处于临界稳定下的三馈入直流系统以及逆变器过电压计算, 验证了新的多馈入系统有效短路比的定义的有效性。

关键词: 高压直流输电; 多馈入系统; 多馈入相互作用因子; 多馈入有效短路比; 暂态过电压; 电压相互作用

基金项目: 国家自然科学基金项目(51177044); 中央高校基本科研基金项目(10ZG02)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51177044); The Fundamental Research Funds for the Central Universities (10ZG02).

0 引言

随着中国直流输电线路的建设, 出现了多条直流线路同时向同一地区输送电能的网架结构, 形成了多馈入的直流系统。与单回直流系统相比, 多馈入直流系统中换流器间的相互作用将对其暂态过电压^[1-2]、换相失败^[3-4]、故障恢复^[5]和功率/电压稳定性^[6-7]产生影响。针对多馈入系统的稳态和动态特性已有很多研究, 并提出了相关的指标来定量衡量多馈入系统的交流系统强度、换流器间的相互作用^[8-10]及逆变器换相失败等特性。但是这些研究都是针对只含有逆变器接入的多馈入直流系统, 随着直流线路的增加, 多馈入系统的结构愈加复杂。根据规划, 未来溪洛渡水电和甘肃风电将送入华中电网^[11], 与目前运行的三常、三广和三沪直流共同组成含有整流站接入的多馈入直流系统。此外, 单回直流的功率反送也会出现含有整流站接入的多馈入直流系统。对于此类多馈入直流系统, 需要对整流-逆变的相互作用进行研究, 考虑整流站接入对于逆变器系统强度的影响, 研究整流站和逆变站的动态过电压特性及其与电压相互作用的关系。

本文将以往多馈入系统研究工作延伸到含有整流站接入的多馈入系统, 基于潮流方程建立了双馈入和三馈入系统的稳态数学模型^[12-13], 对其电压相互作用进行研究, 并与传统多馈入系统进行了比较。研究了含有整流站接入的多馈入系统的最大功率曲线, 基于最大功率曲线法提出考虑整流站影响的多馈入系统有效短路比定义, 并进行了验证。此

外,通过研究整流-逆变相互作用对于逆变站过电压的影响,从另一方面验证了所提出的有效短路比定义的正确性。

1 系统模型

典型的含有整流站的双馈入直流系统如图1所示,此系统含有2条与国际大电网标准直流测试系统^[14]模型参数相同的直流线路。直流线路1可以看作单回标准直流测试系统工作在功率反转方式;整流侧采用定电流控制,逆变侧采用定熄弧角控制。图1中,交流系统的电压等级为230kV,用系统等值阻抗 Z_{S1} 、 Z_{S2} 和联络线阻抗 Z_{tie} 表示,其中 Z_{S1} 和 Z_{S2} 的阻抗角为 75° ,并保持不变, Z_{tie} 的参数为 $0.41\angle 80.5^\circ \Omega/\text{km}$ 。通过改变 Z_{S1} 、 Z_{S2} 和 Z_{tie} 可以得到不同系统强度和相互作用强度的多馈入系统。在额定状态下,换流母线的电压设为 $1\angle 0^\circ \text{ pu}$,母线之间的联络线没有功率流动。

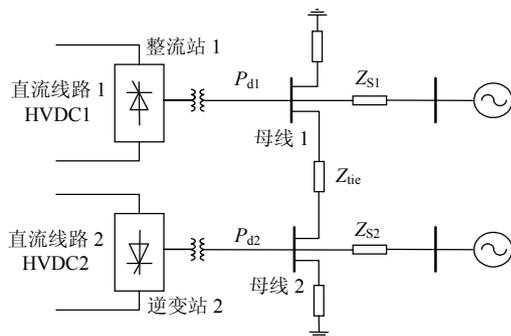


图1 含有整流站接入的双馈入测试系统结构图

Fig.1 Schematic diagram of the dual-infeed test system with a rectifier connection

2 整流-逆变电压的相互影响

2.1 有效短路比

多馈入系统中换流母线 m 的有效短路比(effective short circuit ratio, ESCR)^[15]可定义为

$$F_{\text{ESCR}m} = \frac{S_m - Q_{im}}{|P_{dm}|} \quad (1)$$

式中: S_m 为考虑其他直流系统无功补偿容量影响的母线 m 的短路容量; Q_{im} 为母线 m 所连接的无功补偿设备在额定电压下的容量; $|P_{dm}|$ 为接于母线 m 的直流系统额定功率,不考虑其方向。

2.2 多馈入相互作用因子

多馈入相互作用因子(multi-infeed interaction factor, MIIF)^[1]主要用于衡量多馈入系统中任意2个换流站之间的电压相互影响强度,记为 F_{MIIF} 。在换流母线 n 上人为并入感性负载,这引起约1%的

电压跌落,由此导致换流母线 m 的电压跌落值即为换流站 m 对换流站 n 的电压影响因子 $F_{\text{MIIF}mn}$,其定义为

$$F_{\text{MIIF}mn} = \frac{\Delta U_m}{\Delta U_n} \quad (2)$$

式中 ΔU_m 和 ΔU_n 分别为在换流母线 n 接入感性负载后,换流母线 m 和 n 的电压变化量。

多馈入相互作用因子可定量描述换流母线电压跌落对于其他换流母线的电压影响。对于含有整流器接入的多馈入系统,整流站与其他逆变站之间的电压相互作用强度仍可以用多馈入相互作用因子来衡量。

2.3 整流-逆变电压的相互影响

采用图1所示的双馈入测试系统(多馈入系统I)研究整流站与逆变站之间的电压相互作用,将此系统中直流线路1的整流站和逆变站互换,建立了只含有逆变站接入的另一种双馈入系统(多馈入系统II)并以其作为参照。基于潮流方程建立了这2类多馈入系统的稳态模型,并计算他们的 F_{MIIF} 进行比较研究。设定2条换流母线联络线的长度 $L=50\text{ km}$,直流系统的额定功率均为1000MW, $F_{\text{ESCR}2}$ 为2.0并保持不变, $F_{\text{ESCR}1}$ 从1.0变化至4.5。图2所示为2种多馈入系统的 F_{MIIF} 随 $F_{\text{ESCR}1}$ 变化的曲线。

文献[1]指出 F_{MIIF} 的范围在0.0~1.0之间,当 $F_{\text{MIIF}}=0.0$ 时,表示换流母线之间电气距离很远,没有电压相互作用;当2条直流线路接入同1条母线时,电压相互作用最强,此时 $F_{\text{MIIF}}=1.0$ 。但根据图2可知,1.0并不是 F_{MIIF} 的上限,当一个较强的交流系统与较弱的交流系统相连时, F_{MIIF} 可能会出现大于1.0的情况。

与逆变站相比,整流站的无功消耗对于电压幅值的变化更为敏感。当整流站交流母线电压降低时,整流站将更多的降低无功需求,从而防止换流母线电压幅值的进一步降低。逆变站对于其他整流站的影响由于整流站的这种无功特性而被削弱了,因此在图2中表现为含有整流站接入的多馈入系统的 $F_{\text{MIIF}12}$ 值总比只含有逆变站的多馈入系统的 $F_{\text{MIIF}12}$ 值小。对于交流网架固定的多馈入系统来说, $F_{\text{MIIF}mn}$ 的数值由母线 m 所接入的换流站无功消耗相对于母线电压幅值的灵敏度的大小决定,因此在2类多馈入系统中无论整流站还是逆变站,对于另一条直流逆变站的电压影响基本是相同的。

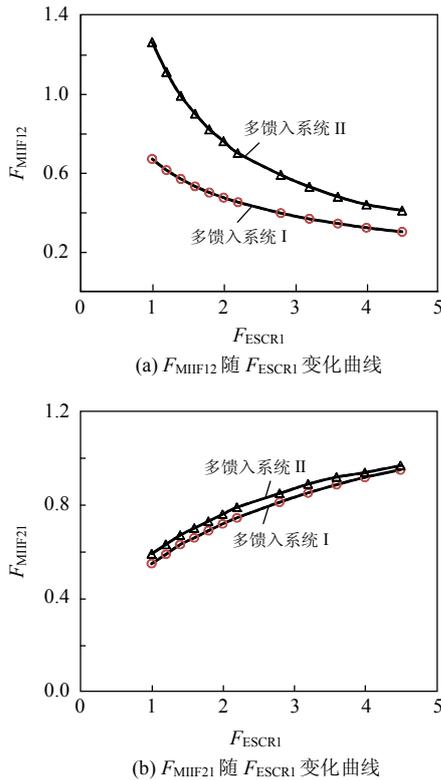


图 2 2 种多馈入系统的 MIIF 指标比较

Fig. 2 Comparison on MIIF between two multi-infeed systems

3 含整流站接入的多馈入系统强度评估

3.1 最大直流功率曲线

直流系统的功率-电流曲线随其有效短路比的大小而改变。根据定义，直流系统由于其短路比的不同可将其分为极弱、弱和强系统 3 种类型。对于系统强度较弱的直流系统可能会出现功率不稳定的问题。若单回直流系统在额定电流下获得最大直流功率点，此时其有效短路比也称为临界有效短路比(critical ESCR, CESCR)，其大小约为 1.5(逆变侧熄弧角 γ 约为 $15^\circ \sim 18^\circ$)。因此，最大直流功率曲线也可以反映出直流系统所接入交流系统的强度^[8-9]。

对于多馈入系统来说，单个逆变站的直流功率-电流曲线与单回直流的直流功率-电流曲线类似，因此最大直流功率曲线也可以用于多馈入系统的强度评估的研究中。如果多馈入系统中某一回直流系统在额定电流下所对应的直流功率为最大功率，那么此直流线路接入的交流系统强度与有效短路比为 1.5 的单回直流所接入的交流系统强度相同。

多馈入直流系统中任意 1 条直流线路逆变站的最大功率点会受到其他直流线路运行状态的影响。在本节中针对图 1 所示的双馈入系统，对采用 2 种

方案获得的直流线路 2 的直流功率-电流(P_d-I_d)曲线进行了比较：方案 1 中所有直流系统按照相同速率将直流电流 I_d 从 0 升至 1.25 pu；方案 2 中将一回直流系统的直流电流 I_d 从 0 升至 1.25 pu，同时保持系统内的其他直流线路工作在额定工况下。采用这 2 种方案获得的直流功率-电流曲线如图 3 所示，同时在图中给出了相应的系统参数。

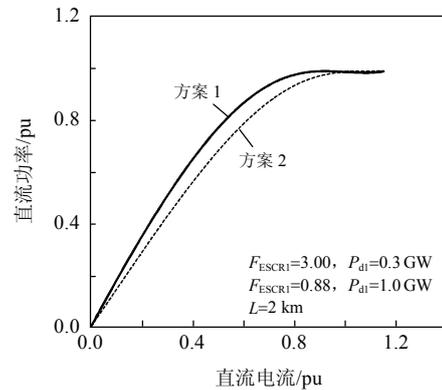


图 3 2 种方案的直流线路 2 的直流功率-电流曲线

Fig. 3 P_d-I_d curves of HVDC 2 in scenario 1 and scenario 2

由图 3 可知：当采用方案 1 时，直流线路 2 在其额定直流电流处获得最大直流功率点，即直流线路 2 处于临界状态；而当采用方案 2 时，直流线路 2 在直流电流为 1.09 pu 处获得最大直流功率点。因此，对于多馈入系统，采用不同的方案所得到的最大功率点是不同的。

为了进一步比较这 2 种方案，将图 1 所示的系统进行变化，将联络线长度设为 2 km。采用 2 种方案得到的另外 1 组直流功率-电流曲线如图 4(a)和图 4(b)所示，其中图 4(b)给出了在额定直流电流附近图 4(a)部分直流功率-电流曲线。与图 3 的结果相比略有不同，在方案 1 中，当直流电流在 0.92~1.08 pu 范围内时，直流线路 2 处于不稳定状态。采用方案 2 时直流功率-电流的曲线斜率大于等于零，直流线路 2 不存在不稳定区域。

对于实际系统，为了减小直流系统对交流系统的影响，直流系统不会同时启动。但当系统发生故障后，所有直流线路可能会同时恢复至额定状态，这种情况与方案 1 类似。因此采用方案 1 得到的最大直流功率曲线给出了系统处于最不利情况下的交流系统强度。下文的结论均基于方案 1 得到。

3.2 含整流站接入的多馈入系统有效短路比

3.2.1 多馈入有效短路比

文献[9]给出了多馈入有效短路比(multi-infeed effective short circuit ratio, MIESCR)的定义。多

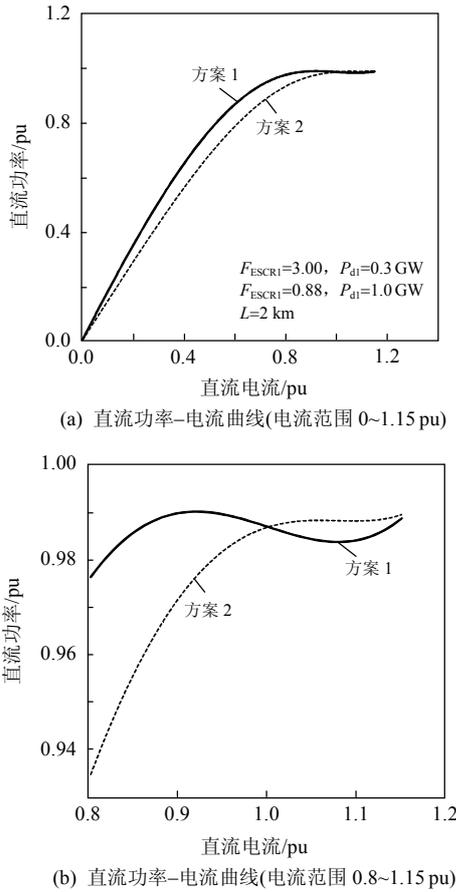


图4 2种方案的直流线路2直流功率-电流曲线

Fig. 4 P_d - I_d curves of HVDC 2 in scenario 1 and scenario 2

馈入有效短路比是传统单回直流有效短路比概念的延伸,对多馈入系统中其他直流的影响进行了定量描述。对于只含有逆变站接入的多馈入直流系统来说,换流母线 n 的有效短路比 $F_{MIEFSCR_n}$ 的定义为

$$F_{MIEFSCR_n} = \frac{S_n - Q_{fn}}{P_{dn} + \sum_{m=1 \& m \neq n}^N (F_{MIIF_{mn}} P_{dm})} \quad (3)$$

式中 N 为多馈入系统中所馈入直流线路的总个数。对于含有整流站接入的多馈入系统,本文基于图1所示的双馈入系统构建了不同电压相互影响程度和有效短路比的系统,并采用式(3),对直流线路2的多馈入有效短路比进行了计算,结果如表1所示。通过最大直流功率法对计算结果的分析表明,式(3)无法正确描述含有整流站接入的多馈入系统的强度。

为了将多馈入有效短路比的概念应用到含有整流站接入的多馈入系统,在大量参数研究的基础上,对考虑整流站影响的多馈入系统有效短路比定义如下:

$$F_{MIESCR_n} = \frac{S_n - Q_{fn}}{P_{dn} + \sum_{m=1 \& m \neq n}^N [(-1)^k F_{MIIF_{mn}}^a |P_{dm}|]} \quad (4)$$

式中 $|P_{dm}|$ 为换流母线 m 所接入的直流线路的额定容量的数值,不考虑其方向。如果 m 为逆变站母线,则系数 $a=1, k=0$; 如果 m 为整流站母线,则 $a=2.2, k=1$ 。对于不含有整流站接入的多馈入系统来说,式(4)的定义与式(3)相同。

由式(4)可知,整流站的接入可以增加多馈入系统的交流电网相对于其他逆变站的强度,但由于幂指数 a 的作用,使得这种作用变得较弱。

使用有效短路比代替系统短路容量,式(4)可表示为

$$F_{MIESCR_n} = \frac{F_{ESCR_n}}{1 + \sum_{m=1 \& i \neq j}^N [(-1)^k F_{MIIF_{mn}}^a \left| \frac{P_{dm}}{P_{dn}} \right|]} \quad (5)$$

3.2.2 含有整流站接入的双馈入系统有效短路比定义的验证

文献[9]已对式(3)的正确性进行了验证,因此本节主要采用图1的测试系统验证了新定义的有效性。当2个换流站之间的联络线较长时,其相互作用可以忽略,此时 $F_{MIIF}=0$, 因此对于直流线路2来说,其多馈入有效短路比与传统单回直流线路的有效短路比相同。当2条直流线路接入同一条母线时, $F_{MIIF}=1.0$, 根据新定义,此时直流线路2的短路比为

$$F_{MIESCR_2} = \frac{S_2 - Q_{f2}}{P_{d2} - P_{d1}} \quad (6)$$

由式(6)可知,此时直流线路2的多馈入有效短路比与接入换流母线2单回容量为 $P_{d2}-P_{d1}$ 的直流线路相同。

为了验证新定义能否描述除上述2种极端情况外的含整流站接入的多馈入系统强度,保持直流线路2的额定功率不变,通过设定特定的线路长度 L 、直流线路1的额定容量 P_{d1} 和系统有效短路比,使直流线路2在额定电流下获得最大功率点,即直流线路2接入的系统强度为临界强度,并根据式(3)和(5)计算了此时直流线路2相应的多馈入有效短路比。表1中给出这些系统的参数以及计算得到的相应 F_{MIIF} 和 F_{MIESCR_2} 数值。

表1的结果表明,当功率曲线显示直流线路2处于临界系统强度时,根据式(3)计算出的多馈入有效短路比的范围为1.0~1.5,因此原有的定义无法准确描述含整流站接入的多馈入直流系统的强度。而式(5)由于考虑了2条直流线路的电压相互作用,得到的直流线路2的多馈入有效短路比的值落于[1.4, 1.6]内,大致接近1.5(单回直流系统的CESCR)。表

表 1 直流线路 2 处于临界条件下的多馈入系统参数
Tab. 1 Parameters of test system with HVDC 2 in the critical stability

P_{d1}/GW	F_{ESCR1}	F_{ESCR2}	L/km	F_{MIIF12}	F_{MIESCR2} (式 3)	F_{MIESCR2} (式 5)
0.2	6.00	1.15	2	0.98	0.96	1.42
0.8	2.00	1.16	50	0.49	0.83	1.39
1.0	2.00	1.20	50	0.42	0.85	1.41
1.2	2.00	1.24	50	0.37	0.86	1.43
0.6	1.50	1.15	80	0.56	0.86	1.38
1.0	1.50	1.27	80	0.41	0.90	1.48
0.8	2.00	1.30	80	0.40	0.98	1.46
1.0	2.00	1.34	80	0.33	1.01	1.47
0.8	2.50	1.35	80	0.35	1.05	1.47
1.0	2.50	1.38	80	0.30	1.06	1.48
0.5	3.00	1.31	80	0.46	1.07	1.44
2.0	3.00	1.48	80	0.14	1.16	1.52
0.5	3.50	1.35	80	0.43	1.11	1.46
1.5	3.50	1.47	80	0.17	1.17	1.52
0.5	1.50	1.31	150	0.46	1.07	1.44
1.5	1.50	1.50	150	0.17	1.20	1.55
0.5	2.00	1.37	150	0.39	1.15	1.46
1.0	2.00	1.47	150	0.21	1.21	1.52
3.5	2.00	1.49	150	0.06	1.23	1.50
0.5	2.50	1.41	150	0.35	1.20	1.48
1.5	2.50	1.50	150	0.13	1.26	1.53
1.0	3.00	1.50	2 000	0.01	1.49	1.50

中同时列出了相应的 F_{MIIF12} 值,其中最小值为 0.01,最大值为 0.96,代表了电压相互作用由弱到强的含有整流站接入的多馈入系统。

但需要指出的是,上述结论是基于图 1 所示的含有整流站接入的双馈入系统得到的。对于多于 2 条直流馈入的系统,还需进一步进行验证。

表 2 HVDC2 处于临界条件下的第 1 种三馈入系统参数

Tab. 2 Parameters of Case 1 in the triple-infeed system with HVDC 2 in critical stability

P_{d1}/GW	P_{d2}/GW	P_{d3}/GW	F_{ESCR1}	F_{ESCR2}	F_{ESCR3}	L_{12}/km	L_{13}/km	L_{23}/km	F_{MIIF12}	F_{MIIF32}	F_{MIESCR2}
1.0	1.0	0.8	3.0	1.6	3.0	200	100	1 000	0.15	0.12	1.48
1.2	1.0	0.8	3.0	1.6	3.0	200	100	1 000	0.13	0.11	1.49
1.2	1.0	0.8	3.0	1.7	3.0	200	100	300	0.15	0.23	1.46
1.0	1.0	1.2	2.4	2.2	1.9	50	50	50	0.57	0.72	1.40

表 3 HVDC2 处于临界条件下的第 2 种三馈入系统参数

Tab. 3 Parameters of Case 2 in the triple-infeed system with HVDC 2 in critical stability

P_{d1}/GW	P_{d2}/GW	P_{d3}/GW	F_{ESCR1}	F_{ESCR2}	F_{ESCR3}	L_{12}/km	L_{13}/km	L_{23}/km	F_{MIIF12}	F_{MIIF32}	F_{MIESCR2}
1.0	1.0	0.8	2.00	1.41	1.99	100	1 000	100	0.32	0.32	1.65
0.8	1.0	0.8	2.30	1.40	1.98	100	1 000	100	0.36	0.32	1.64
0.8	1.0	1.2	2.30	1.25	2.00	100	1 000	200	0.35	0.19	1.40
0.8	1.0	1.2	2.40	1.10	2.00	50	100	200	0.49	0.30	1.47

3.2.3 含有整流站接入的三馈入系统有效短路比验证

为了验证新的多馈入短路比的定义能否正确描述含有多于 2 条直流线路的多馈入系统,本节将图 1 所示的双馈入系统扩展至三馈入系统。与双馈入系统相比,含有整流站接入的三馈入系统较为复杂。研究中主要考虑了 2 种结构的含有整流站接入的三馈入系统。第 1 种结构中直流线路 1、直流线路 2 和直流线路 3 三条直流线路接入交流系统,其中直流线路 1 经过整流站与交流系统连接,直流线路 2 和直流线路 3 经过逆变站与交流系统连接。在第 2 种结构中,直流线路 1 和直流线路 3 经过整流站接入交流系统,直流线路 2 通过逆变站接入交流系统。建立了 2 种结构的稳态数学方程后,可以得到各种参数下的 F_{MIIF} 值以及各个直流线路的功率曲线。保持直流线路 2 的额定容量为 1000MW,同时改变 3 个换流站间联络线的长度(L_{12} , L_{23} 和 L_{13})和各个直流线路的有效短路比,使直流线路 2 处于临界状态,根据式(5)计算出其多馈入短路比的数值。表 2 和表 3 分别给出了基于 2 种结构得到的计算结果和对应的系统参数。

计算结果表明,在这 2 种结构的三馈入直流系统中,处于临界状态的直流线路 2 根据式(5)得到的其多馈入有效短路比数值在 1.5 左右,这与 3.2.2 节双馈入系统的计算结果类似。因此新的多馈入系统短路比定义不仅可以描述纯逆变站接入多馈入系统中直流线路的交流系统强度,也可以正确描述含有整流接入的多馈入系统中各逆变站所接入的交流系统强度,这与单回直流的有效短路比的概念类似。

4 含有整流站接入的多馈入直流系统动态过电压研究

动态过电压(transient overvoltage, TOV)是直流系统的另外一个重要指标^[16-18]。对于单回直流系统,有效短路比是影响动态过电压的主要因素。从另一方面来说,过电压的程度也可以反映出交流系统相对于所馈入的直流系统的强度。对于多馈入系统来说,交流或直流系统的扰动都可以引起动态过电压,但绝大多数的过电压都是由直流线路所传输功率的突然变化而引起的^[2]。

本节基于图1所示的含有整流站接入的双馈入系统,对不同电压作用程度和系统强度的双馈入系统进行了动态过电压计算,对于直流线路2的多馈入短路比和动态过电压的关系进行了分析,分析结果从另一方面验证了所提出的多馈入短路比定义的正确性。

研究中所采用的双馈入系统根据换流站之间线路的长度不同(40、80和160km)可以分为3类。2条直流的额定容量均为1000MW,有效短路比分别由2.0增至5.0,步长为1.0。对直流线路2闭锁导致的逆变器母线的动态过电压进行了研究。

国际大电网标准直流测试系统逆变侧有效短路比与换流母线动态过电压 U_{TOV} 的关系如图5中的实线所示。对于单回直流线路来说,其有效短路比与多馈入有效短路比是相同的。在额定运行点将直流线路2闭锁,并保持其无功补偿装置与系统连接,对于这种情况下的48个双馈入系统中直流线路2逆变侧的 U_{TOV} 进行了计算,并根据式(5)得到了这48个双馈入系统中直流线路2的多馈入有效短路比,图5给出了多馈入有效短路比 $F_{MIESCR2}$ 和动态过电压 U_{TOV} 之间的关系。

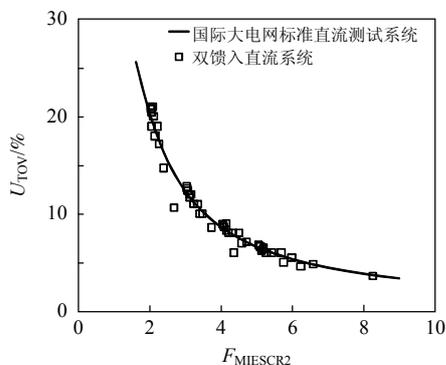


图5 双馈入测试系统母线2(逆变交流母线)动态过电压与多馈入有效短路比的关系

Fig. 5 Correlation between U_{TOV} and $F_{MIESCR2}$ of bus 2 (the inverter AC bus) in the dual-infeed test system

由图5可以看出,对于多馈入系统中经逆变站接入的直流系统,其多馈入有效短路比所对应的过电压值均匀分布在实线的两侧。对于本地直流闭锁所引起的过电压,式(5)所给出的多馈入有效短路比与单回直流的有效短路比的作用是相同的。多馈入有效短路比可以用于评估逆变站换流母线的过电压程度。此外,图5的结果也从另外一个侧面证明了文中给出的多馈入短路比定义的正确性。

5 结论

本文主要研究了含有整流站接入的多馈入交流系统的电压相互作用,给出了考虑整流-逆变电压相互作用的新的多馈入有效短路比的定义,并对其进行了验证。主要结论如下:

1) 由于整流站的无功消耗对于电压的变化更加敏感,因此与逆变器相比,整流站受其他母线电压变化的影响程度较小。多馈入相互作用因子可以衡量这种相互影响的程度。

2) 整流站的接入可以增加多馈入系统中的其他逆变站的强度,基于最大直流功率法,本文提出了考虑整流站作用的多馈入有效短路比的定义,利用含有整流站接入的多馈入系统中处于临界条件的直流线路验证了定义的正确性。

3) 文中提出的新的多馈入有效短路比在衡量多馈入系统中逆变器交流母线动态过电压方面,与单回直流系统的逆变站的有效短路比的作用相同。

参考文献

- [1] Davies J B. System with multiple DC infeed [J]. *Electra*, 2007(233): 25-29.
- [2] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure and overvoltage phenomena in multi-infeed HVDC system[C]//Proceeding Colloquium of Role of HVDC, FACTS and Emerging Technologies in Evolving Power Systems. Bangalore, India: CIGRE, 2005: 54-73.
- [3] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure in single- and multi-infeed HVDC systems[C]//The 8th IEE International Conference on AC and DC Power Transmission. London, UK: IEE, 2006: 182-186.
- [4] Rahimi E, Gole A M, Davies J B, et al. Commutation failure analysis in multi-infeed HVDC systems[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2011, 26(1): 378-384.
- [5] Reeve J, Lane-Smith S P. Multi-infeed HVDC transient response and recovery strategies[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 1993, 8(4): 1995-2001.
- [6] Denis L, Andersson G. Power stability analysis of

- multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(3): 923-931.
- [7] Denis L, Andersson G. Voltage stability analysis of multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(3): 1309-1318.
- [8] 林伟芳, 汤涌, 卜广全. 多馈入交直流系统短路比的定义和应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(31): 1-8. Lin Weifang, Tang Yong, Bu Guangquan. Definition and application of short circuit ratio for multi-infeed AC/DC power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(31): 1-8(in Chinese).
- [9] Fernando I T, Kent K L, Davis J B, et al. Parameters for planning and evaluation of multi-infeed HVDC Schemes [C]//Proceeding of CIGRE 2007 Osaka Symposium. Osaka, Japan: GIGRE, 2007: F-750008.
- [10] 金小明, 周保荣, 管霖, 等. 多馈入直流交互影响强度的评估指标[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(15): 98-102. Jin Xiaoming, Zhou Baorong, Guan Lin, et al. HVDC-interaction-strength index for the multi-infeed HVDC power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 98-102(in Chinese).
- [11] 刘振亚, 舒印彪, 张文亮, 等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 1-8. Liu Zhenya, Shu Yinbiao, Zhang Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8(in Chinese).
- [12] Smed T, Andersson G, Sheble G B, et al. A new approach to AC/DC power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 1238-1244.
- [13] 徐政. 交直流电力系统动态行为分析[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004: 52-60. Xu Zheng. Analysis on AC-DC Power system dynamic behavior[M]. Beijing: China Mechanical Industry Press, 2004: 52-60 (in Chinese).
- [14] Szechtman M, Wess T, Thio C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. Electra, 1991(135): 54-73.
- [15] Krishayya P C S, Adapa R, Holm M, et al. IEEE guide for planning DC links terminating at AC locations having low short-circuit capacities, part I: AC/DC system interaction phenomena[R]. France: CIGRE, 1997.
- [16] 韩民晓, 文俊, 徐永海. 高压直流输电原理与运行[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009: 123-130. Han Minxiao, Wen Jun, Xu Yonghai. Principle and operation of HVDC[M]. Beijing: China Mechanical Industry Press, 2009: 123-130(in Chinese).
- [17] 赵婉君. 高压直流输电工程技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 218-230. Zhao Wanjun. HVDC engineering technology [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004: 218-230(in Chinese).
- [18] Arrillaga J. High voltage direct current transmission [M]. London: The institution of Electrical Engineers, 1998: 233-235.



陈修宇

收稿日期: 2011-07-18。

作者简介:

陈修宇(1981), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统建模、仿真与分析, chenxiuyu@ncepu.edu.cn;

韩民晓(1963), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为高压直流输电与 FACTS 技术、电能质量分析与控制、电力系统建模等, hanminxiao@263.net;

刘崇茹(1977), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向交直流输电系统分析仿真、运行与控制, chongru.liu@ncepu.edu.cn。

(编辑 胡琳琳)

System Strength Evaluation of Multi-infeed HVDC Systems Integrated With Rectifier Stations

CHEN Xiuyu¹, HAN Minxiao¹, LIU Chongru¹, Ani. M. Gole²

(1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical and Computer Engineering, University of Manitoba, Winnipeg R3T 5V6, Canada)

KEY WORDS: HVDC transmission; multi-infeed system; multi-infeed interaction factor; multi-infeed effective short circuit ratio; transient overvoltage; voltage interaction

In this paper, the multi-infeed effective short circuit ratio (MIESCR) concept is extended to the inverter/rectifier infeed system. The proposed new definition is expressed in Equ. (1).

$$F_{MIESCRn} = \frac{S_n - Q_{fn}}{P_{dn} + \sum_{m=1 \& m \neq n}^N [(-1)^k F_{MIIFmn}^a |P_{dm}|]} \quad (1)$$

In Equ. (1), $|P_{dm}|$ (P_{dn}) is the rated power value of HVDC line m (n); S_n is the short circuit capacity of bus n ; Q_{fn} is the capacity of shunt capacitors and filters at bus n ; F_{MIIF} is the value of MIIF. N is the number of the converter. If bus n is an inverter bus, $a=1$, $k=0$. If bus n connects a rectifier, $a=2.2$, $k=1$.

For a single-infeed HVDC system, its maximum available power (MAP) point indicates strength of ac network. If ESCR=1.5, it will get the MAP point at the rate current, and it is in the critical stability condition. The load-flow studies are conducted to validate Equ. (1), using integrated inverter/rectifier multi-infeed systems, which is shown in Fig.1. The tie line length, ESCR values of the two converters and the rated power of the HVDC 1 are varied to set the HVDC 2 in critical stability. The rated power of the inverter (HVDC 2) is maintained at 1 000 MW. MIESCR values of these cases fall in the range of 1.35~1.53.

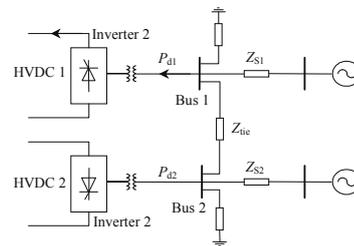


Fig. 1 Mixed inverter/rectifier dual-infeed system

Two types of integrated rectifier/inverter triple-infeed system are used to verify the Equ. (1). In type 1, HVDC 1 connects its rectifier to the ac system while HVDC 2 and HVDC 3 are inverter-infeed HVDC systems. In type 2, only HVDC 2 is inverter-infeed while the other HVDCs connect their rectifiers to the ac system. HVDC 2 in these cases is in critical stability at the nominal rating power by varying local ESCR and tie line length. In these cases, the rated power of HVDC 1 and HVDC 2 are also changed to verify the new index in different conditions. The critical MIESCR values for HVDC 2 in these cases are shown in Tab.1 and Tab.2.

The results in the tables show that the critical MIESCR values are from 1.40 to 1.65 with the interaction from weak to strong. The new definition of MIESCR has the same function as the ESCR on indicating the ac system strength.

Tab. 2 Parameters of Case 1 in the triple-infeed MI system with HVDC 2 in critical stability

P_{d1}/GW	P_{d2}/GW	P_{d3}/GW	F_{ESCR1}	F_{ESCR2}	F_{ESCR3}	L_{12}/km	L_{13}/km	L_{23}/km	F_{MIIF12}	F_{MIIF32}	$F_{MIESCR2}$
1.0	1.0	0.8	3.0	1.6	3.0	200	100	1000	0.15	0.12	1.48
1.2	1.0	0.8	3.0	1.6	3.0	200	100	1000	0.13	0.11	1.49
1.0	1.0	1.2	2.4	2.2	1.9	50	50	50	0.57	0.72	1.40

Tab. 3 Parameters of Case 2 in the triple-infeed MI system with HVDC 2 in critical stability

P_{d1}/GW	P_{d2}/GW	P_{d3}/GW	F_{ESCR1}	F_{ESCR2}	F_{ESCR3}	L_{12}/km	L_{13}/km	L_{23}/km	F_{MIIF12}	F_{MIIF32}	$F_{MIESCR2}$
1.0	1.0	0.8	2.00	1.41	1.99	100	1000	100	0.32	0.32	1.65
0.8	1.0	0.8	2.30	1.40	1.98	100	1000	100	0.36	0.32	1.64
0.8	1.0	1.2	2.40	1.10	2.00	50	100	200	0.49	0.30	1.47