

基于短路容量量化评估的大规模新能源直流送端电网运行方式优化方法

牛拴保^{1,2}, 柯贤波², 任冲², 霍超², 王智伟², 张钢², 卫琳²

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710079; 2. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048)

摘要: 直流送端电网中需保证一定数量的常规机组提供短路容量以平抑电压波动, 而开机容量过大将挤占新能源消纳空间, 为电网运行方式优化带来了难题。对此, 基于支路潮流法揭示了暂态过电压与直流母线短路容量的关系, 推导出保证一定暂态过电压水平的最小母线短路容量的量化算法, 提出了利用常规机组短路电流权重指数作为考虑短路容量约束的机组优化组合权重因子, 给出了常规机组开机方式与各条直流短路容量需求之间的量化关联关系。基于该方法建立了考虑直流近区短路容量约束的机组组合优化模型, 采用机组组合优化算法统筹考虑各种约束, 优化机组开机方式, 在保证安全稳定运行的基础上实现了新能源最大消纳。最后以西北某省级电网为例验证了所提方法的有效性及其优越性。

关键词: 特高压直流; 暂态过电压; 短路容量; 机组组合; 优化

中图分类号: TM 721.1

文献标志码: A

DOI: 10.16081/j.epae.202108016

0 引言

随着特高压直流、新能源的快速发展, 大规模新能源集中接入直流近区, 由于直流故障扰动冲击大且新能源机组抗扰动能力差, 直流故障后直流母线及近区新能源暂态过电压问题突出^[1-2], 易引发风机连锁脱网问题^[3-4], 上述问题已成为制约直流功率及新能源送出的主要因素。

目前, 针对直流故障后的暂态过电压问题已有相对深入的研究, 主要集中在以下2个方面。一方面是对直流控保系统控制模式及控制参数进行优化。文献[5]通过对直流控制各个环节的参数与暂态过电压的之间关系进行研究, 得到对暂态过电压影响最大的参数。文献[6]通过优化直流低压限流环节、换相失败预测及电流控制器等重要控制参数以降低故障期间无功变化。文献[7]通过延长直流闭锁的时间给予滤波器足够长的切除时间。但直流系统控制参数的改变需考虑系统整体稳定性, 给参数优化带来很大难度, 延长直流闭锁时间的方法不利于高压直流系统的运行, 可能会导致连锁故障发生^[8]。另一方面主要集中在新能源机组故障穿越及切机策略优化方面。文献[4, 9-10]研究了新能源机组故障穿越特性, 提升了机组的无功支撑能力。文献[11]提出通过优化安控切机策略降低压升水平。此外还可通过加装无功补偿设备吸收暂态无功功率^[12], 采用优化直流与无功补偿设备控制策略^[13-14]抑制暂态过电压。由于重新规划建设、开展新能源

场站改造成本较高, 对已投入运行的系统而言这类方法很难实现。上述研究对暂态过电压研究抑制提供了一定参考, 但大多处于研究阶段, 未见其应用于实际工程的相关报道。

电网实际运行中, 针对过电压问题, 一般通过大量仿真计算, 在新能源出力、直流功率等固定的边界条件下, 得出直流近区电厂的常规机组最小开机台数, 在运行中对开机方式进行预控。由于基于离线数据的机组组合及仿真分析无法枚举到系统所有可能的运行方式, 只能重点考虑近区新能源和常规机组的开机方式, 并通过运行控制方案将直流输送功率与近区常规机组的开机台数关联起来。由于难以考虑网内其他常规机组及近区其余直流配套机组电厂的开机方式, 直流送出系统常规机组的开机台数需保持较大值, 在新能源大量消纳期间, 降低了新能源消纳空间。

目前, 针对机组组合及运行方式的研究也比较深入, 大多集中在对各类机组组合优化求解算法以及多目标、多约束、多决策变量机组组合研究等方面^[15-17], 考虑直流群暂态过电压及短路电流容量支撑约束的机组开机方式优化研究相对较少。由于暂态过电压问题出现的本质在于故障近区无功支撑(即短路容量)不足, 除了直流近区机组可以向直流提供短路容量外, 网内其余机组同样可以提供短路容量, 在直流、新能源运行方式一定的情况下, 对系统短路容量的要求可以转换为对网内所有常规水火电开机方式的要求, 即系统短路容量优化问题可以转化为网内所有常规水火电开机方式的优化问题。

基于上述思路, 本文提出了考虑系统短路容量支撑约束的机组优化调度方法, 推导出保持一定暂

收稿日期: 2021-03-18; 修回日期: 2021-06-23

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5100-202036013A-0-0-00)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(5100-202036013A-0-0-00)

态过电压水平下的最小母线短路容量的量化算法,提出采用常规机组短路电流权重指数,作为短路容量约束的机组优化组合权重因子,构建常规机组开机方式与各条直流换流站母线短路容量的关联关系,在满足各直流短路容量约束的情况下统筹各类约束条件,优化机组开机方式,以实现安全可靠、最大限度新能源消纳的目标。通过实际省级电网算例进行验证,本文方法具有较大工程实用价值,该方法在西北电网得到实际应用,提升了新能源高效利用水平,对能源转型、“双碳”目标的实现具有重要意义。

1 考虑暂态过电压约束的系统短路容量需求算法

1.1 暂态过电压产生机理

图1为新能源场站通过直流送出系统示意图。一般而言,当直流发生换相失败时,其所引起的暂态过电压问题最为严重^[18]。发生换相失败后,直流功率下降,换流站消耗的无功功率迅速减小,而换流站交流滤波器仍在运行,换流站盈余的无功功率将涌入交流母线,导致交流母线过电压。由于直流系统输送容量一般较大,这部分无功功率也较大,这是导致直流近区过电压程度较高的主要原因。当直流发生连续换相失败时,换流变压器的铁芯在过电压下迅速饱和,吸收盈余无功能力下降,从而导致第2、3次换相失败后暂态过电压水平更高。整体而言,直流故障期间送端电压呈现“先降低后升高”特性,直流系统换相失败典型曲线见附录A图A1。

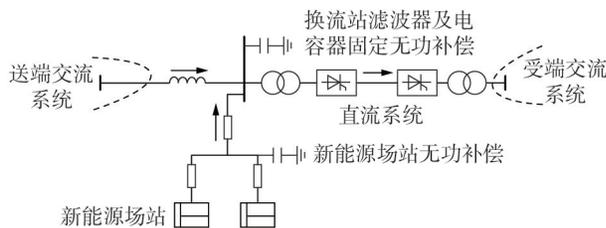


图1 大规模新能源直流送出系统无功补偿示意图

Fig.1 Schematic diagram of reactive power compensation for large-scale new energy DC sending-end system

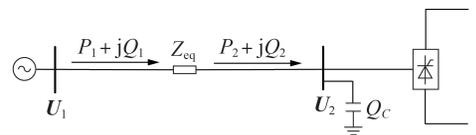
换相失败初期的暂态电压降低会传导至近区新能源场站,导致新能源机组进入低电压穿越状态。为了保护逆变器,新能源机组低电压穿越期间有功会迅速下降并缓慢恢复,还有部分不具备低电压穿越功能的新能源机组则可能直接脱网。风电进入低电压穿越状态或直接脱网将引起风电场的有功出力减少,导致风电场也向系统注入一定的无功,引起风电场暂态电压升高,进一步加剧了系统的暂态压升水平。

1.2 考虑暂态过电压约束的短路容量需求算法

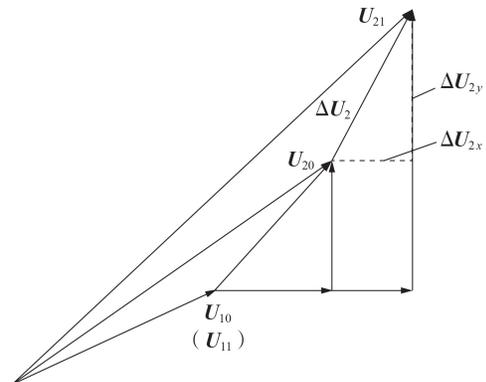
特高压直流送出系统等值电路示意图如图2(a)

所示。图中, Q_c 为直流滤波器及电容器无功功率; P_1 、 P_2 、 Q_1 、 Q_2 和 U_1 、 U_2 分别为交、直流母线有功、无功及电压; Z_{eq} 为系统等值阻抗。根据支路潮流公式,可以得出直流母线电压与送端系统潮流的关系^[4,8-10],进而推导出节点负荷变化引起节点电压变化时的暂态压升计算表达式,得出暂态压升水平与系统母线短路容量强相关。在确保相应直流母线满足最小短路容量约束的同时,能够确保直流故障后的暂态过电压水平基本满足要求。

图2(b)为直流故障前、后系统电压相量图。图中, U_{20} 、 U_{21} 分别为故障前、后直流母线电压; ΔU_{2x} 、 ΔU_{2y} 分别为等值电路直流母线电压变化量 ΔU_2 的横、纵轴分量; U_{10} 、 U_{11} 分别为故障前、后交流母线电压,由于送出交流系统容量较大,可认为故障前、后等值电源处电压不变,即 $U_{10}=U_{11}$, U_{10} 表示等值的无穷大交流电网电压。由 P_1 、 Q_1 、 U_1 可求得 ΔU_2 。



(a) 等值电路图



(b) 电压相量示意图

图2 新能源直流送出系统等值电路及电压相量图

Fig.2 Equivalent circuit and voltage phasor diagram of new energy DC sending-end system

根据图2(b)可得:

$$\begin{cases} \Delta U_{2x} = \frac{\Delta P_1 R_{eq} + \Delta Q_1 X_{eq}}{U_{10}} \\ \Delta U_{2y} = \frac{\Delta P_1 X_{eq} - \Delta Q_1 R_{eq}}{U_{10}} \end{cases} \quad (1)$$

式中: R_{eq} 、 X_{eq} 分别为系统等值电阻、电抗; ΔP_1 为交流电网通过直流外送的有功功率变化量; ΔQ_1 为交流电网注入直流系统的无功功率变化量。

高压输电系统中可忽略电阻,即 $R_{eq}=0$ 。设 S_{ac} 为直流母线短路容量, $X_{eq}=U_{10}^2/S_{ac}$,则根据图2(b)得到 ΔU_2 的简化计算公式为:

$$\Delta U_2 = \frac{\Delta Q_2 U_{10}}{S_{ac}} = \frac{\Delta Q_2 U_{10}}{S_{sc} + S_{cond}} \quad (2)$$

$$S_{sc} = \frac{\Delta Q_1 U_{10}}{\Delta U_2} - S_{cond} \quad (3)$$

式中: S_{cond} 为直流系统无功补偿容量; ΔQ_2 为换流站与交流系统无功交换变化量,针对直流送端换流站,正常运行时滤波器、电容器可为直流输电系统提供无功补偿,稳态工作时其与系统交换的无功功率一般为0,即可认为故障前 $Q_2 \approx 0$,故 ΔQ_2 主要取决于直流故障后系统的无功盈余。

直流换相失败故障期间有功降至0,因此故障期间直流系统无功盈余量 Q_{dc} 基本为系统正常运行时的无功补偿量,即 $\Delta Q_2 = Q_{dc}$ 。直流输电系统中换流站在稳态运行时消耗数值约为有功功率的40%~60%,换流站无功盈余与其传输有功功率间满足:

$$Q_{dc} = P_{dc} \frac{\sin(2\alpha) - \sin[2(\alpha + \mu) + 2\mu]}{\cos(2\alpha) - \cos[2(\alpha + \mu)]} \quad (4)$$

式中: P_{dc} 为直流功率; α 为触发角; μ 为换相重叠角。当直流近区新能源功率大发期间, ΔQ_2 应叠加考虑直流近区新能源注入的无功盈余,根据新能源故障期间无功盈余经验统计数据,将新能源有功出力的20%计入直流故障期间新能源提供的无功盈余。

将暂态过电压约束要求 ΔU_2 和直流故障期间的无功盈余 ΔQ_2 代入式(2),即可得出在一定直流功率下满足暂态过电压约束的直流换流站母线最小短路容量需求。

由式(2)、(3)可以看出,在网架结构确定的情况下,暂态过电压问题本质是由故障母线系统短路容量不足所造成的。正常运行时,系统(特别是特高压直流接入母线)应确保一定的短路容量,以保证直流严重故障期间,电压变化不会引起交流母线以及新能源机组的过电压保护动作使设备跳闸。

通过推导暂态过电压与短路容量之间的关系,可以根据最大允许暂态过电压标准,得出特定直流功率下最小运行短路容量约束,用于指导机组运行方式。

2 考虑短路容量约束的机组组合优化算法

2.1 机组短路电流权重指数

特定母线的短路容量主要取决于网架结构和机组开机方式,不同机组到短路容量计算点的等值阻抗不同,所提供的短路容量支撑也不尽相同;不同机组开机方式下母线的短路容量也不相同。为了便于利用优化算法实现发电机组统筹优化调度,需要量化不同机组对特定母线的短路容量支撑大小。本文提出了常规机组的系统短路电流权重指数,将常规电源机组向特定母线提供的短路电流作为加权因

子,实现机组开机方式与系统短路容量约束定量关联,使优化机组开机方式时能够准确反映不同方式下系统短路容量的大小。

母线短路容量为母线额定电压 V_N 和三相故障电流 I_f 乘积,如式(5)所示。

$$S_{sc} = V_N^* I_f^* S_{base} \quad (5)$$

式中: S_{base} 为系统基准容量; V_N^* 、 I_f^* 分别为 V_N 、 I_f 标幺值。 I_f^* 为式(5)中唯一的未知项,特定母线的系统短路容量可进一步简化为短路故障电流计算,母线短路故障电流越大表明系统短路容量越大。

由于风电、光伏等新能源电源通常采用低电压等级并网的开发利用模式,与直流换流站(通常落于超高压、特高压交流电网)之间的电气距离较大,且新能源机组因逆变器容量的限制所能提供的故障电流有限,对换流母线短路电流影响较小,本文暂未考虑新能源对短路电流的影响。

常规水火电的故障电流约为其额定电流的3~5倍,是系统故障电流即短路容量的主要贡献者,系统短路容量大小主要取决于常规机组开机方式。针对不同的直流换流站母线,因常规水火电接入的电气距离、容量大小的不同,所贡献的短路容量也大不相同。电气距离越近、容量越大,所贡献的短路容量越大。系统短路容量是否充分主要取决于并网常规水火电的开机组合,因此系统短路容量约束可以转换成机组组合的整数约束问题。为了定量表示各台机组对特定母线系统短路电流权重指数,必须为每台常规水火电机组分配合理的短路电流贡献权重,以便可以利用安全约束机组组合(SCUC)算法优化统筹安排常规水火电运行方式,实现最优目标的同时满足特定直流母线短路容量约束。

针对多直流、大规模新能源、火电打捆送出系统,为同时满足多个目标母线的最小短路容量约束,必须利用优化算法统筹计算。基于本文提出的短路电流权重指数,可以利用优化算法实现机组运行方式的统筹优化。

由于常规水火电机组具有较大的导纳值,机组将输出较大的故障电流。同时,常规水火电机组到故障点的电气距离也可以用网络导纳矩阵中的分支导纳来描述,离特定母线电气距离较近的机组会输出较大短路电流。因此,电气网络导纳矩阵 Y 能够根据故障电流贡献来反映常规水火电机组的大小和位置,根据导纳矩阵计算得到的机组到特定母线的短路电流可以作为计算短路容量约束时的机组权重因子。

研究机组 i 向母线 j 提供的短路容量为 S_{ij} 时,可以通过将系统中除机组 i 外的其余全部机组内电势清零,以机组 i 的电压为额定电压,然后利用短路电流计算程序求出常规机组 i 向母线 j 提供的故障电

流 I_{ij} , 如式(6)所示。

$$\begin{bmatrix} I_{i1} \\ \vdots \\ I_{ij} \\ \vdots \\ I_{in} \end{bmatrix} = Y \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ V_i \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$S_{ij} = V_N^* I_{ij}^* S_{base} \quad (7)$$

式中: V_i 为机组 i 的内电势; I_{ij}^* 为 I_{ij} 标么值; n 为母线总数。

2.2 考虑系统短路容量约束的机组运行方式优化

为了确保所研究母线具有足够的短路容量, 并网的常规水火电机组 S_{ij} 的总和应不小于所需的最低限值。对于已知短路容量最小约束的特高压直流换流站母线, 将其在每个机组组合优化周期中的系统短路容量约束表示为:

$$M_s \sum_{i=1}^k S_{ij} x_i \geq S_{j\text{scmin}} \quad j=1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中: x_i 为机组 i 的运行状态, 其取值为 0 表示运行正常, 其取值为 1 表示机组停运; $S_{j\text{scmin}}$ 为母线 j 所需要的最小短路容量; M_s 为 S_{ij} 的修正系数; k 为常规机组总数。 $S_{ij} x_i$ 代表系统中并网运行常规机组向特定母线提供的短路容量。式(8)将系统短路容量约束与系统常规水火电机组的开机方式关联起来, 将该约束扩充到机组组合优化程序中, 即可实现考虑短路容量约束的机组开机方式优化。因实际运行中由于机组间相互作用、接线方式、联络线影响, 由式(8)对所有常规机组短路容量权重指数相加得到的母线短路容量与实际值会存在一定差异, 需要引入修正系数 M_s 进行修正。 M_s 可以通过对实际运行方式下所研究母线短路容量计算值与式(8)计算值进行对比迭代估算, 适当减小 M_s 会导致常规水火电机组的开机容量增大并增加系统短路容量, 提升安全裕度, 该过程见附录 A 图 A2。

考虑约束的机组运行方式优化问题数学模型如式(9)所示。

$$\begin{cases} \max_{X, U} F(X, U) \\ \text{s.t. } g_1(X, U) = 0, g_2(X, U) \leq 0, F = \sum_{w=1}^W \sum_{t=1}^T P_{w,t} \end{cases} \quad (9)$$

式中: F 为优化函数, 针对高占比新能源电网, 一般设目标函数 $F(X, U)$ 的新能源消纳空间最大; X 为机组运行状态向量; U 为实变量的向量, 即每台机组的出力、电量; W 为新能源场站总数; T 为时段总数; g_1 和 g_2 分别为机组开机方式组合中的等式和不等式约束; $P_{w,t}$ 为新能源场站 w 在时段 t 下的出力。等式约束为潮流方程约束, 不等式约束包含机组运行约束、网络安全约束、电量偏差约束、备用联络线约束及三公调度约束等。将短路容量约束式(8)扩充至式(9)

中, 即可实现考虑短路容量约束的机组运行方式优化。由于式(8)为代数和的不等式约束, 对计算量及收敛性的影响相对较小, 利用这种方法能直接求出满足各种约束的机组组合方案, 便于实际运行控制, 提升机组组合安排工作的安全性及高效性。

上述问题为混合整数规划问题, 是典型的安全约束机组组合问题, 可以利用 CPLEX 等成熟的优化算法求解得到机组运行方式, 再通过安全约束经济调度(SCED)程序计算分配出各发电机组各时段出力, 进一步优化得到各台机组的功率曲线。

3 仿真算例

以某省级电网 2019 年典型日机组日前开机方式安排为例, 进行仿真验证。该省级电网通过 2 条特高压直流 1、2 分别向中部、东部某省级电网送电, 简化示意图如附录 A 图 A3 所示。全网总装机容量为 86 GW, 火电装机容量为 49.4 GW, 水电装机容量为 6.9 GW, 风电和光伏发电装机容量约为 28.7 GW, 平均负荷为 28 GW。电网中新能源装机容量比例约为 33%, 新能源消纳压力较大, 在进行机组开机方式优化时通常以新能源出力最大为优化目标。在对机组组合算法优化前, 由于机组组合算法无法考虑暂态过电压约束, 在进行开机方式安排时, 需要依靠人工专家按照离线直流运行控制方案进行机组开机方式复核, 以确保近区常规机组开机台数满足规定中直流功率要求, 机组方式安排效率和新能源消纳空间仍有进一步提升空间。

由于特高压直流 1、2 近区均规划建设大量配套火电机组, 同时网内还有 XY、GT 等诸多系统公用电厂, 控制方案中对直流特定功率下的配套电源开机方式进行规定, 而网内众多公用电厂开机方式实际对直流故障后的暂态过电压水平也有较大影响, 有必要统筹考虑网内所有机组提供短路容量情况。典型日负荷及新能源出力曲线如图 3 所示, 该日直流 1、2 最大送电功率分别为 6、4.8 GW。根据成套设计书特高压直流母线最大暂态过电压要求均为最大不超过 1.25 p.u., 通过式(3)求出直流 1、2 换流站母线最小短路容量分别为 34 800、20 544 MV·A。

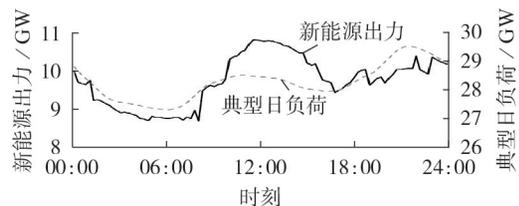


图3 典型日负荷及新能源出力曲线

Fig.3 Curves of typical daily load and new energy output power

通过本文方法对机组优化组合算法进行优化,

利用机组短路电流权重因子将上述 2 条换流站母线短路容量与网内所有机组开机方式相关联,将短路容量约束条件扩充至机组优化算法,以负荷预测和新能源预测、计划发电量、网络拓扑作为输入,将新能源消纳最大为优化目标进行机组组合优化,同时考虑系统平衡、机组运行限制、计划电量安排、电网安全等约束条件,建立以 15 min 为周期的优化模型,通过机组状态、有功出力、电网安全的联合优化以及多时段耦合优化,计算出最优的机组开机方式。按照附录 A 图 A2 所示方法,通过 11 次迭代将修正因子 M_s 调整为 0.89 后,直流 1、2 换流站母线短路容量满足约束条件,具体迭代过程如图 4 所示。由式(8)可看出, M_s 越小安全裕度越大,实际运行中可根据电网安全裕度需求调整 M_s 大小。

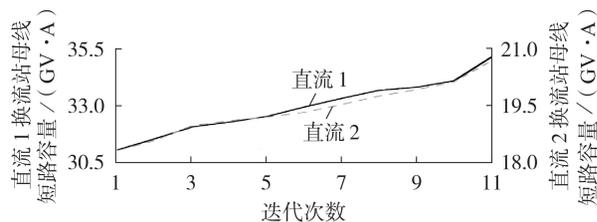


图 4 修正系数迭代过程

Fig.4 Iteration process of correction coefficient

具体机组组合优化算法示意图如图 5 所示,算法数学模型见附录 B。

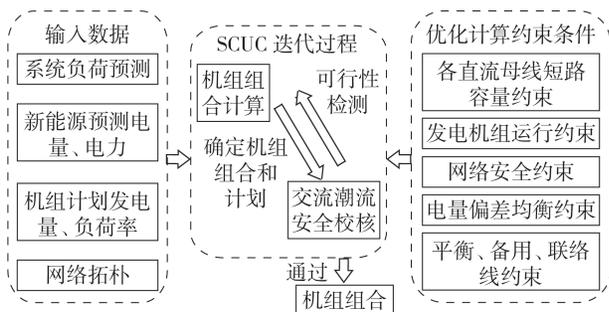


图 5 系统算法示意图

Fig.5 Schematic diagram of system algorithm

根据图 3 所示该省级电网典型日负荷及新能源出力曲线,分别采用人工安排的机组运行方式以及通过机组组合算法优化前、后得出的机组运行方式 3 种方案,对机组开机容量进行对比分析,如图 6 所示。依靠人工进行机组开机方式安排相对平直,机组启停相对较少,无法统筹考虑各种约束实现新能源消纳最大化。当采用机组组合最优算法进行机组开机方式优化时,算法会充分考虑各类约束实现新能源消纳空间最优的开机方式。由综合负荷与不同常规机组开机方式下的最小可调出力,得出不同开机方式下的新能源消纳空间,人工安排开机方式对应的新能源消纳空间为 44.625 GW·h,应用优化算法后的开机方式下新能源消纳空间为 46.932 GW·h。

相较于人工安排开机方式,优化后的开机方式下新能源消纳空间提升了 5.17%。

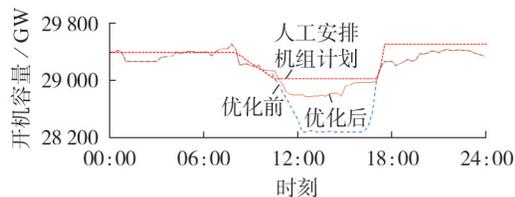
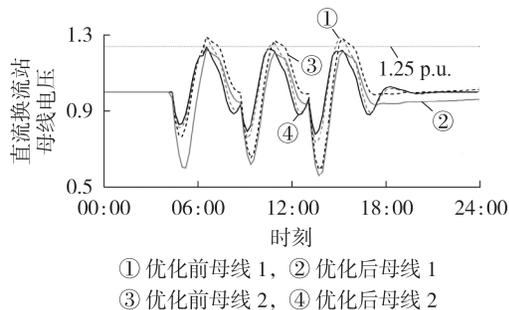


图 6 优化前、后常规机组开机容量与人工安排机组计划对比

Fig.6 Comparison of conventional unit start-up capacity before and after optimization with manual arrangement unit plan

分别采用改进前、后的机组组合优化算法求出典型日机组开机方式,图 7 为当日开机容量最低时通过离线时域仿真得出的直流 1、2 故障后的母线暂态压升情况,图中母线电压为标么值。由图可知,当未考虑直流母线短路容量约束时,由于当日新能源出力预测较大,会出现新能源消纳最大化,部分时段开机方式较小,直流母线暂态过电压不能满足约束的情况。考虑短路容量约束的机组组合安排相较于优化前的开机方式所具有的安全性更高。

图 7 开机容量最低时 2 条直流母线暂态过电压情况
Fig.7 Transient overvoltage conditions of two DC buses when start-up capacity is lowest

综上,相比采用人工安排机组计划,采用本文提出的改进机组组合算法进行机组开机方式优化,可实现在保证安全运行的基础上使常规机组开机容量最小,提升新能源消纳空间。相比改进前的机组组合优化算法,所提算法可以确保系统暂态过压水平不超标,保障系统安全稳定运行。同时由于本文方法考虑了网内所有常规机组向特定母线提供短路容量的影响,不局限于直流功率与近区火电机组的强耦合关系,可以大幅提升机组开机方式安排的灵活性。

4 结论

1) 大规模新能源接入直流近区送出的电网中,暂态过电压水平与系统短路容量强相关。基于支路潮流法揭示了暂态过电压与直流母线短路容量的关系,推导出保证一定暂态过电压水平的最小母线短

路容量的算法,提出了母线短路容量与暂态过电压之间的量化关系。

2)基于母线短路容量与常规机组开机方式之间关联关系,本文提出了常规机组短路电流权重指数,构建了直流换流站母线短路容量与常规机组开机方式之间的关联关系,并将其作为安全约束扩充至机组组合优化算法中,从而实现了考虑暂态过电压约束的机组开机方式优化。该方法不仅可用于日前机组开机方式优化,还可用于月度机组组合的安全校核。

3)对西北某省级电网实际算例进行分析,结果表明,本文所提算法在实现常规机组开机方式最小、新能源消纳空间最大的同时,满足暂态过电压约束,证明了该方法的有效性和实用性。

4)本文算法考虑了网内所有常规机组对特定母线提供短路容量的影响,能够准确反映不同方式下母线短路容量,提升了网内机组开机方式安排的灵活性,为实现新能源消纳最大化奠定基础,在当前能源转型背景下具有重要意义。

本文主要分析了常规机组对母线短路容量的影响,随着直流及新能源快速发展,新能源机组将对短路容量产生一定影响,直流间的耦合作用将加剧。后续将进一步研究考虑新能源机组并网及直流耦合作用对母线短路容量的影响。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 屠竞哲,张健,刘明松,等. 风火打捆直流外送系统直流故障引发风机脱网的问题研究[J]. 电网技术,2015,39(12):3333-3338.
TU Jingzhe,ZHANG Jian,LIU Mingsong,et al. Study on wind turbine generators tripping caused by HVDC contingencies of wind-thermal-bundled HVDC transmission systems[J]. Power System Technology,2015,39(12):3333-3338.
- [2] 赵宏博,姚良忠,王伟胜,等. 大规模风电高压脱网分析及协调预防控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(23):43-48,65.
ZHAO Hongbo,YAO Liangzhong,WANG Weisheng,et al. Outage analysis of large scale wind power under high voltage condition and coordinated prevention and control strategy[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(23):43-48,65.
- [3] 崔晓丹,吴家龙,雷鸣,等. 新能源高占比电力系统的连锁故障诱因及事故链搜索技术探讨[J/OL]. 电力自动化设备. (2021-02-04)[2021-03-18]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202103006>.
- [4] 秦世耀,姜蓉蓉,刘晋,等. UHVDC闭锁引发风电场暂态过电压分析及HVRT协调控制[J]. 电力自动化设备,2020,40(6):63-69.
QIN Shiyao,JIANG Rongrong,LIU Jin,et al. Transient overvoltage analysis of wind farm with UHVDC block and HVRT coordinated control[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(6):63-69.
- [5] 罗煦之,张健,贺静波,等. 计及暂态过电压约束的直流闭锁管控与极控协调控制研究[J]. 电网技术,2015,39(9):2526-2531.
LUO Xuzhi,ZHANG Jian,HE Jingbo,et al. Coordinated control research of stability control system and pole control system under DC system block considering transient overvoltage[J]. Power System Technology,2015,39(9):2526-2531.
- [6] 冀肖彤. 抑制HVDC送端交流暂态过电压的控制策略优化[J]. 电网技术,2017,41(3):721-728.
JI Xiaotong. Optimization of HVDC control system for mitigating AC transient overvoltage on rectifier station[J]. Power System Technology,2017,41(3):721-728.
- [7] 郑超,霍超,摆世彬,等. 基于实际工程控制系统的直流受扰特性分析:电压快速波动下整流端特性及其优化[J]. 高电压技术,2018,44(1):304-313.
ZHENG Chao,HUO Chao,BAI Shibin,et al. Analysis on disturbance characteristics of HVDC based on actual engineering control system-disturbance characteristics of rectifier side and its optimization[J]. High Voltage Engineering,2018,44(1):304-313.
- [8] 韩平平,陈凌琦,胡迪,等. 直流闭锁暂态过电压对风电外送影响及其抑制措施[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(5):99-105.
HAN Pingping,CHEN Lingqi,HU Di,et al. Impact of transient overvoltage caused by DC block on wind power transmission and its suppression measure[J]. Power System Protection and Control,2018,46(5):99-105.
- [9] 郑超,林俊杰,赵健,等. 规模化光伏并网系统暂态功率特性及电压控制[J]. 中国电机工程学报,2015,35(5):1059-1071.
ZHENG Chao,LIN Junjie,ZHAO Jian,et al. Transient power characteristic of scaled photovoltaic grid-connected system and its voltage control[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(5):1059-1071.
- [10] 陈厚合,鲁华威,王长江,等. 抑制直流送端系统暂态过电压的直流和风电控制参数协调优化[J]. 电力自动化设备,2020,40(10):46-55.
CHEN Houhe,LU Huawei,WANG Changjiang,et al. Coordinated optimization of HVDC and wind power control parameters for mitigating transient overvoltage on HVDC sending-side system[J]. Electric Power Automation Equipment,2020,40(10):46-55.
- [11] 袁森,陈得治,罗亚洲,等. 直流闭锁冲击弱交流通道的稳定特性及多资源协调控制措施[J]. 电力自动化设备,2018,38(8):203-210.
YUAN Sen,CHEN Dezhi,LUO Yazhou,et al. Stability characteristics and coordinated control measures of multi-resource for DC blocking fault impacting weak AC channel[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(8):203-210.
- [12] WANG C H,FU Y. Fully parallel stochastic security-constrained unit commitment[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2016,31(5):3561-3571.
- [13] 朱丽萍,刘文颖,邵冲,等. 基于调相机与SVC协调的抑制高压直流送端风机脱网的控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(6):107-113.
ZHU Liping,LIU Wenyong,SHAO Chong,et al. Control strategy of suppressing wind turbine tripping based on coordination between synchronous condenser and SVC in sending-end network of HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(6):107-113.
- [14] 赵亚清,刘青,谢欢,等. 考虑源网协调的风电场动态无功补偿装置控制策略[J]. 电力自动化设备,2015,35(8):118-123.
ZHAO Yaqing,LIU Qing,XIE Huan,et al. Dynamic reactive power compensator control considering source-grid coordination for wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(8):118-123.
- [15] UPADHYAY A,HU B Q,LI J,et al. A chance-constrained wind range quantification approach to robust scuc by determining dynamic uncertainty intervals[J]. CSEE Journal of Po-

- wer and Energy Systems,2016,2(1):54-64.
- [16] WU H Y, KRAD I, FLORITA A, et al. Stochastic multi-timescale power system operations with variable wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(5):3325-3337.
- [17] 包宇庆,王蓓蓓,李扬,等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报,2016,36(17):4589-4600.
BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(17):4589-4600.
- [18] 屠竞哲,张健,曾兵,等. 直流换相失败及恢复过程暂态无功特性及控制参数影响[J]. 高电压技术,2017,43(7):2131-2139.
TU Jingzhe, ZHANG Jian, ZENG Bing, et al. HVDC transient reactive power characteristics and impact of control system

parameters during commutation failure and recovery[J]. High Voltage Engineering,2017,43(7):2131-2139.

作者简介:



牛栓保

牛栓保(1978—),男,陕西西安人,教授级高级工程师,博士研究生,主要研究方向为电力系统安全稳定与控制;

柯贤波(1979—),男,陕西商洛人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统安全稳定与控制;

任冲(1984—),男,安徽淮北人,高级工程师,硕士,通信作者,主要研究方向为电力系统安全稳定与控制(E-mail:119074735@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Optimal method of operation modes for large-scale new energy DC sending-end power grid based on short circuit capacity quantitative assessment

NIU Shuanbao^{1,2}, KE Xianbo², REN Chong², HUO Chao², WANG Zhiwei², ZHANG Gang², WEI Lin²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710079, China;

2. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: It is necessary for DC sending-end power grid to ensure that certain conventional units provide short circuit capacity to suppress voltage fluctuations. However, excessive start-up capacity will occupy the space of new energy consumption, which brings difficulties to optimal method of operation modes for power grid. Based on branch power flow method, the relationship between transient overvoltage and DC bus short circuit capacity is revealed, and the quantitative algorithm of minimum bus short circuit capacity of conventional unit to ensure a certain transient overvoltage level is derived. The weight index of short circuit current is proposed as the weight factor of unit optimal combination considering the constraint of short circuit capacity. The quantitative relationship between the start-up mode of conventional units and the demand of DC short circuit capacity is given. Based on this method, a unit commitment optimal model considering the constraints of DC short circuit capacity is established, and the unit commitment optimization algorithm is adopted to consider all kinds of constraints to optimize the start-up mode of the units, so as to achieve the maximum consumption of new energy on the basis of ensuring operation safety. Finally, a provincial power grid in Northwest China is taken as an example to verify the effectiveness and superiority of the proposed method.

Key words: UHVDC; transient overvoltage; short circuit capacity; unit commitment; optimization

附录 A

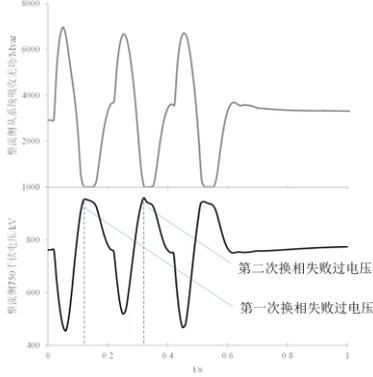


图 A1 直流系统换相失败典型曲线

Fig.A1 Typical curve of DC system commutation failure

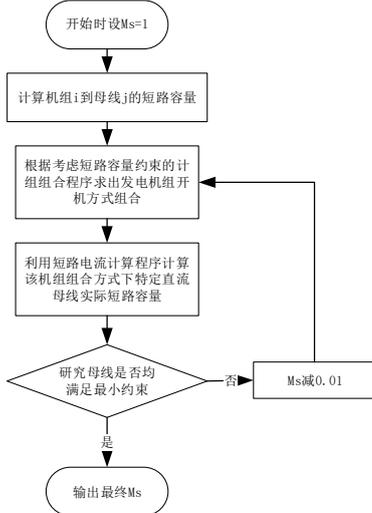


图 A2 修正系数迭代估算流程

Fig.A2 Flowchart of iterative estimation process of correction coefficient

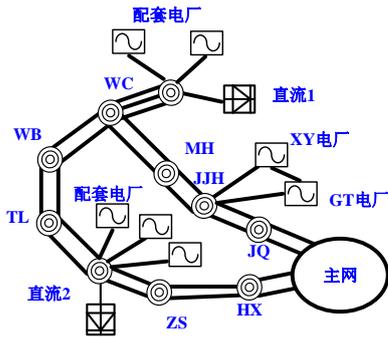


图 A3 省级电网直流送出简化示意图

Fig.A3 Simplified schematic diagram of DC transmission from provincial power grid

附录 B

(1) 发电机组约束条件。

机组最小开停机时间约束为：

$$V_{t,i}^{\text{on}} - T_i^{\text{min_on}} (u(i,t-1) - u(i,t)) \geq 0 \quad (\text{B1})$$

$$V_{t,i}^{\text{off}} - T_i^{\text{min_off}} (u(i,t) - u(i,t-1)) \geq 0 \quad (\text{B2})$$

机组出力上下限约束为：

$$u_{i,t} P_{i,t}^{\text{min}} \leq P_{i,t} \leq u_{i,t} P_{i,t}^{\text{max}} \quad (\text{B3})$$

机组计划电量约束为：

$$Q_{i,\text{min}} \leq \frac{\beta}{60} \sum_{t=1}^T P_{i,t} \leq Q_{i,\text{max}} \quad (\text{B4})$$

机组负荷率约束为：

$$\alpha_{i,\text{min}} \leq \frac{P_{i,t}}{P_{i,t}^{\text{max}}} \leq \alpha_{i,\text{max}} \quad (\text{B5})$$

机组爬坡滑坡约束为：

$$P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_t^U \alpha_{i,t-1} + P_{i,t}^{\text{min}} (\alpha_{i,t} - \alpha_{i,t-1}) + P_{i,t}^{\text{max}} (1 - \alpha_{i,t}) \quad (\text{B6})$$

电厂最小运行方式约束为：

$$\sum_{i \in A_f} u_{i,t} \geq M_f \quad (\text{B7})$$

(2) 安全约束条件。

短路容量约束为：

$$K_s \sum_{i=1}^K (S_{ij} X_i) \geq S_{\text{smin}} \quad (\text{B8})$$

支路容量约束为：

$$P_{j,\text{min}} \leq \sum_{i \in M} P_{i,t} S_{i,j,t} - \sum_{k \in M} l_{k,t} S_{k,j,t} \leq P_{j,\text{max}} \quad (\text{B9})$$

断面传输功率为：

$$P_{s,\text{min}} \leq \sum_{i \in M} P_{i,t} S_{i,s,t} - \sum_{k \in M} l_{k,t} S_{k,s,t} \leq P_{s,\text{max}} \quad (\text{B10})$$

(3) 系统约束条件。

负荷平衡约束为：

$$\sum_{i=1}^N P_{i,t} = L_t \quad (\text{B11})$$

正备用容量约束为：

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,t}^{\text{max}} \geq L_t + R_t^u \quad (\text{B12})$$

负备用容量约束为：

$$\sum_{i=1}^N u_{i,t} P_{i,t}^{\text{min}} \geq L_t - R_t^d \quad (\text{B13})$$

功率交换约束为：

$$P_{a,\text{min}} \leq P_{a,t} \leq P_{a,\text{max}} \quad (\text{B14})$$