

考虑FID综合损耗的柔性互联配电网 检修日经济运行优化策略

张真, 欧阳森, 杨墨缘, 吴晗

(华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640)

摘要:针对负载均衡策略未考虑柔性互联装置(FID)的综合损耗对经济运行的影响,且未涉及检修日经济运行方式优化的问题。首先基于仿真采用最小二乘估计法建立换流阀和换流变压器的损耗率模型,以及换流阀的损伤系数模型。其次结合示范工程中的三端柔性互联配电网拓扑结构,根据直流断路器(DCCB)运行状态对系统运行方式进行划分。然后建立检修日两阶段经济运行优化模型,第一阶段以各时段损耗成本最小为目标建立经济时序优化模型;第二阶段以DCCB检修日全天损耗成本最小为目标建立检修日运行方式优化模型。分别采用改进线性递减策略-粒子群优化法(LDW-PSO)和隐枚举法对两阶段模型进行求解。最后算例结果表明该优化策略可快速、准确计算系统时序损耗成本,并有效降低检修日内损耗成本,可为检修提供经济指导。

关键词:FID综合损耗;经济运行;DCCB检修;改进LDW-PSO;柔性互联配电网

中图分类号:TM 715

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202204024

0 引言

相较于联络开关仅具有0-1调节模式,柔性互联装置(FID)^[1]能够平滑调节馈线间潮流分布,具有提高分布式电源(DG)的渗透能力、降低电网损耗、改善电压偏差、均衡馈线负载、提高供电能力等^[2-5]优势,因此利用电力电子技术实现配电网柔性互联的发展前景广阔^[6]。

FID作为柔性互联技术的关键设备,其运行效率影响系统的经济运行。一方面高损耗率的FID将增加系统总损耗,并降低系统设备利用率^[7];另一方面FID的损耗越高其结温越高,大功率传输中功率波动所产生的结温波动尤为显著^[8],结温波动会增大器件焊料层的累积疲劳损伤^[9],缩短设备的使用寿命,增大系统的损耗成本,因此兼顾FID的经济运行具有重要意义。基于FID的直流多端网络中直流断路器(DCCB)的检修将改变系统的运行方式,传统单一运行方式的时序优化模型^[10]难以实现多运行方式下经济运行最优,存在局限性。考虑检修日内运行方式的最优经济切换对设备检修具有重要意义。

目前,针对柔性互联配电网功率优化的相关研究较多^[11-15],但计及FID的综合损耗对经济运行的影

响,并讨论检修日运行方式切换策略的文献较少。文献[11]基于多时间尺度建立了FID、电压源换流器(VSC)分层协调调度模型;文献[12]考虑慢调设备特性和储能荷电状态的时序性,提出多时间尺度电压优化模型。文献[13]以负载均衡为目标,建立了基于四端带有储能装置的柔性软开关(E-SOP)的有源配电网的运行效率优化模型;文献[14]提出了一种计及参数预测误差的FID与联络开关协调优化策略;文献[15]讨论了FID的位置重构以及损耗率的变化对系统线损的影响,其损耗率主观性过强。综上所述,现有文献均未考虑FID损耗率(或将损耗率设为定值),无法讨论FID的损耗和损伤对经济运行的影响,也未涉及检修日运行方式的时序切换策略。

因此,本文提出一种基于FID综合损耗的柔性互联配电网检修日经济运行优化策略。基于最小二乘估计法(LSE)建立FID内关键设备的损耗率模型,并考虑换流阀的疲劳损伤系数;结合珠海唐家湾示范工程的拓扑结构,基于DCCB的运行状态进行多运行方式划分;建立柔性互联配电网检修日两阶段经济运行优化模型,第一阶段建立经济时序优化模型确定FID传输功率及时序损耗成本,第二阶段建立检修日运行方式优化模型确定运行方式的最优切换策略,采用改进线性递减策略-粒子群优化法(LDW-PSO)和隐枚举法(IEM)对两阶段模型进行求解。最后通过算例验证方法的有效性。

1 考虑损耗与损伤的FID综合损耗模型

1.1 FID的损耗率计算模型

FID由多个VSC通过直流网络进行互联。VSC

收稿日期:2021-09-05;修回日期:2022-02-24

在线出版日期:2022-04-15

基金项目:中央高校基本科研业务费重大产学研合作扶持专项(x2dlD2201280);国家自然科学基金资助项目(51677073)

Project supported by the Major Industry University Research Cooperation Support Projects for the Fundamental Research Funds of the Central Universities(x2dlD2201280) and the National Natural Science Foundation of China(51677073)

主要包含换流阀、换流变压器等设备,其中换流阀和换流变压器的损耗约占总损耗的90%^[16]。故本文仅讨论换流阀和换流变压器的损耗模型。

1)换流阀损耗分析。以珠海唐家湾示范工程中换流阀为例,IGBT换流阀拓扑结构图见附录A图A1,拓扑由a、b、c三相单元构成,包含6个桥臂单元,每个桥臂单元由*N*个子模块构成(包括*m*个冗余子模块),各子模块均采用半桥型子模块(HBSM),包含功率器件、直流电容、反并联二极管等元件。

本文在MATLAB平台搭建了半桥型换流阀损耗模型,采用Infineon的FZ1400R17KE4(1700 V / 1400 A)型号IGBT模块进行仿真分析,换流阀仿真模型及参数分别见附录A图A2和表A1。其中换流阀始终运行于单位功率因数,如图1所示,换流阀损耗率随着负载率的增加呈现上升趋势,逆变工况下的损耗率高于整流工况下的损耗率^[17]。

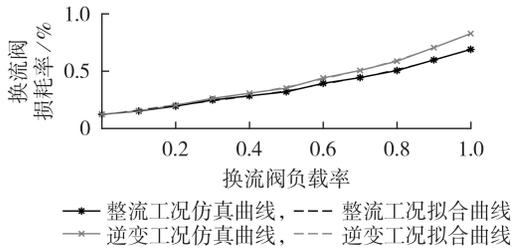


图1 换流阀损耗率拟合曲线

Fig.1 Fitting curves of loss rate of converter valve

在95%置信度下,本文采用三角函数拟合所得换流阀损耗率与负载率关系,如式(1)所示。

$$\xi_{\text{igbt}} = a_w \sin(\beta_{\text{igbt}} - \pi) - b_w (\beta_{\text{igbt}} - C)^2 + c_w \quad (1)$$

式中: ξ_{igbt} 、 β_{igbt} 分别为换流阀的损耗率、负载率; a_w 、 b_w 、 c_w 为对应整流($w = \text{rec}$)或逆变($w = \text{inv}$)工况下的拟合系数; C 为常数。

2)换流变压器损耗。本文在MATLAB中搭建换流变压器仿真模型如附录A图A3所示,换流变压器选型为S11-2000/10。本文考虑谐波对换流变压器的空负载损耗的影响^[18],仿真波形见附录A图A4,其中图A4(a)为不同谐波畸变率下空负载损耗的变化曲线,图A4(b)为不同负载率下总损耗率的变化曲线。

换流变压器的损耗率随负载率的增加呈现先降后升的趋势,谐波畸变率越高,损耗率最低时的负载率呈现减小趋势。基于损耗仿真曲线采用LSE构造换流变压器损耗率与谐波和负载率之间的关联函数,如式(2)所示。

$$\xi_T = a_1 \beta_T^2 + a_2 H^2 + a_3 \beta_T H + a_4 \beta_T + a_5 H + a_6 \quad (2)$$

式中: ξ_T 、 β_T 分别为换流变压器损耗率、负载率; H 为谐波畸变率; a_i ($i = 1, 2, \dots, 6$)为回归系数。

综上可得到FID的损耗率模型如式(3)所示。

$$\xi_{\text{FID}} = \xi_{\text{igbt}} + \xi_T = f(\beta_{\text{igbt}}, w, \beta_T, H) \quad (3)$$

式中: ξ_{FID} 为FID的损耗率; $f(\cdot)$ 为损耗率函数。

1.2 换流阀的损伤模型

换流阀大功率波动会使IGBT模块结温产生强烈波动,影响器件的使用寿命,依据线性疲劳累积损耗原理,采用损伤量来量化结温对子模块的寿命消耗。寿命模型采用Coffin-Mason-Arrhenius模型^[9],单次损伤量 ζ_0 和相邻时间段内子模块损伤量变化量 ΔD 为:

$$\begin{cases} \zeta_0(\beta(t)) = A \Delta T_1^\alpha e^{\frac{E_a}{B(T_m + 273)}} \\ \Delta D = \sum_{i=0}^{K_c} \frac{\zeta_i(\beta(t))}{\zeta_0(\beta(t))} - \sum_{i=0}^{K_c} \frac{\zeta_i(\beta(t-1))}{\zeta_0(\beta(t-1))} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $\beta(t)$ 为*t*时段的负载率; $\zeta_0(\beta(t))$ 为 $\beta(t)$ 下模块的失效循环次数,即 $\beta(t)$ 下换流阀的单次损伤量; ΔT_1 为结温波动; E_a 为活化能; B 为玻尔兹曼常数; A 和 α 为拟合参数; T_m 为结温均值; K_c 为最大循环次数; $\zeta_i(\beta(t))$ 为 $\beta(t)$ 下模块的循环次数,相关参数取值详见文献[9]。

2 含直流多端网络的柔性配电网运行方式

2.1 含直流多端网络的柔性互联配电网

对珠海唐家湾示范工程中基于FID的交直流混合柔性互联配电网拓扑结构进行改进,如图2所示,3条交流10 kV馈线末端通过三端FID进行负荷转移与容量共享。DCCB₁—DCCB₃构成三端直流断路器(3-TCB),DCCB₄、DCCB₅为换流器的端口直流断路器。直流微电源和直流负荷通过直流变压器并入直流网络,多端FID与直流网络构成直流多端网络。

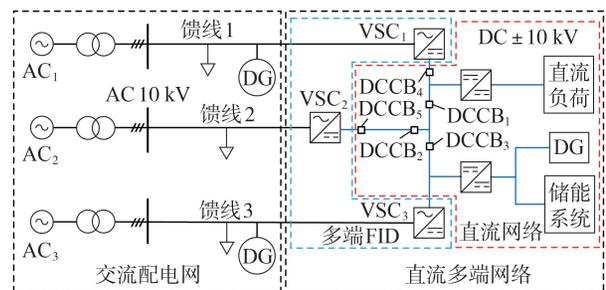


图2 基于FID的交直流混合柔性互联配电网拓扑图

Fig.2 Topology diagram of AC/DC hybrid flexible interconnected distribution network based on FID

2.2 柔性互联配电网运行方式

本文对示范工程中含直流三端网络的柔性互联配电网进行分析。依据直流三端网络内各直流断路器运行状态变化将系统运行模式进行划分:1)三端联网运行;2)双端手拉手运行;3)双端隔离运行;4)单端供电;5)三端静止同步补偿器(STATCOM)。5类运行模式所包含的10种运行方式如表1所示,

具体的系统结构见附录A图A5。表中:数值为1表示DCCB开通;数值为0表示DCCB断开。

表1 系统运行方式划分及设备运行状态
Table 1 System operation mode division and equipment operation status

编号	运行方式名称	运行状态				
		3-TCB			DCCB ₄	DCCB ₅
		DCCB ₁	DCCB ₂	DCCB ₃		
1	三端联网	1	1	1	1	1
2	双端手拉手一	1	1	1	0	1
3	双端手拉手二	1	0	1	1	0
4	双端手拉手三	1	1	0	1	1
5	双端隔离供电	0	1	1	1	1
6	双端隔离运行	0	1	1	0	1
7	AC ₁ 单独供电	0	0	0	1	0
8	AC ₂ 单独供电	1	1	0	0	1
9	AC ₃ 单独供电	1	0	1	0	0
10	三端STATCOM	0	0	0	0	0

1)三端联网运行模式。该运行模式下直流三端网络中所有VSC均并网运行,馈线功率可通过VSC实现双向流动,DG接入直流网络为系统提供电源,此外VSC可为系统提供无功补偿。

2)双端手拉手运行模式。直流网络与交流电网相连的任一端VSC退出运行,剩余两端VSC通过直流电缆互联,为直流电网供电。其中一端VSC采用定直流电压控制,另一端VSC采用功率控制。

3)双端隔离供电运行模式。当3-TCB某一端处于检修或者某一端直流线路区域发生永久性故障时,直流网络解列为2个直流配电系统,交流电网分别通过VSC向2个独立的直流配电系统供电。

4)单端供电运行模式。直流三端网络中任两端VSC退出供电,直流网络的负荷仅由单个VSC进行供电,且该VSC采用直流电压控制方式。

5)STATCOM运行模式。直流三端网络中三端VSC全部退出供电,直流网络的负荷仅通过直流网络自身的储能和分布式电源进行供电。

3 柔性互联配电网检修日经济运行优化模型

本文提出一种柔性互联配电网检修日经济运行优化模型,其分为2个优化阶段:第一阶段以各时段损耗成本最小为目标建立系统经济时序优化模型,确定FID最优传输功率及损耗成本曲线,作为下一阶段的输入;第二阶段以系统检修日全天损耗成本最低为目标建立检修日运行方式优化模型,确定检修日内系统运行方式的最优切换方案。

3.1 系统经济时序优化模型

3.1.1 目标函数

为考虑各个时段DG预测结果的不确定性,本文考虑在第一阶段建立基于交直流潮流的概率潮流模型求解系统损耗以降低预测误差,模型的建立过

程见附录B。第一阶段以FID的综合损耗模型、交直流概率潮流模型^[19]、负荷分段模型以及DG出力的分段形状系数作为输入,并考虑系统对DG的消纳能力以及FID的无功补偿能力,将FID端口功率输出作为优化变量,建立含多端FID的柔性互联配电网经济时序优化模型。本文将1个周期(24h)划分为若干个调控时间段,调控时段内优化目标为系统时序损耗成本最低,第一阶段的目标函数如式(5)所示。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min F_{\text{sys}}(t) = F_{\text{eco,ac}}(t) + F_{\text{eco,dc}}(t) + F_{\text{eco,FID}}(t) \\ F_{\text{eco,ac}}(t) = \Delta t \sum_{x=1}^{N_{k,ac}} \gamma_{\text{acx}}(t) \sum_{j=1}^{N_{N,ac}} \sum_{k \in \Omega(j)} r_{jk,acx} l_{jk,acx} \\ F_{\text{eco,dc}}(t) = \Delta t \gamma_{\text{dc}}(t) \sum_{j=1}^{N_{N,dc}} \sum_{k \in \Omega(j)} r_{jk,dc} l_{jk,dc} \\ F_{\text{eco,FID}}(t) = \sum_{x=1}^{n_{\text{FID}}} (\gamma_{x,\text{FID}}(t) P_{\text{loss},x}(t) \Delta t + \Delta d_x(t) C_{\text{cost},x}) \end{array} \right. \quad (5)$$

式中: F_{sys} 为系统时序损耗成本的目标函数值; $F_{\text{eco,ac}}$ 、 $F_{\text{eco,dc}}$ 、 $F_{\text{eco,FID}}$ 分别为交流网络、直流网络、FID端口功率损耗成本; $N_{k,ac}$ 、 $N_{N,ac}$ 分别为交流馈线条数、各交流馈线节点数; $N_{N,dc}$ 为直流馈线节点个数; γ_{acx} 、 γ_{dc} 分别为交流馈线 x 、直流网络的分时电价; Δt 为调控步长; $\Omega(j)$ 为节点 j 的相邻节点的集合; $r_{jk,m}$ 和 $l_{jk,m}$ 分别为交流馈线 x 所连交流网络($m=\text{acx}$)或直流网络($m=\text{dc}$)中支路 jk 的电阻和电流值的平方值; n_{FID} 为FID端口数; $P_{\text{loss},x}$ 、 $\gamma_{x,\text{FID}}$ 以及 $C_{\text{cost},x}$ 分别为与交流馈线 x 相连的FID端口的功率损耗、站内电价及设备造价成本; Δd_x 为与交流馈线 x 相连的FID内换流阀的疲劳损伤增量。

3.1.2 约束条件

为保证柔性互联配电网安全稳定的运行,本文建立以下约束条件:系统安全运行约束、交直流潮流功率约束、DG运行与消纳约束、FID运行约束。

1) 系统安全运行约束。

$$\left\{ \begin{array}{l} (U_m^{\min})^2 \leq u_{j,m} \leq (U_m^{\max})^2 \\ l_{jk,m} \leq (I_m^{\max})^2 \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: U_m^{\min} 、 U_m^{\max} 分别为交直流系统中节点电压最小、最大允许值; I_m^{\max} 为交直流系统中支路电流最大允许值; $u_{j,m}$ 为交直流系统中节点 j 电压值的平方值。

2) 交直流潮流功率约束。

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i,j \in \Omega_b} (P_{t,ij} - R_{ij} I_{t,ij}^2) + P_{t,j} = \sum_{j,k \in \Omega_b} P_{t,jk} \\ \sum_{i,j \in \Omega_b} (Q_{t,ij} - X_{ij} I_{t,ij}^2) + Q_{t,j} = \sum_{j,k \in \Omega_b} Q_{t,jk} \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: $P_{t,ij}$ 、 $Q_{t,ij}$ 、 $I_{t,ij}$ 分别为 t 时段交直流系统中注入支路 ij 的有功、无功、电流幅值; $P_{t,j}$ 、 $Q_{t,j}$ 分别为 t 时段注入节点 j 的有功功率和无功功率; R_{ij} 、 X_{ij} 分别为支路

ij 的电阻和电抗; Ω_b 为支路集合。

t 时段节点 i 上的有功和无功功率注入方程为:

$$\begin{cases} P_{t,i} = P_{t,i}^{\text{DG}} + P_{t,i}^{\text{FID}} + P_{t,i}^{\text{L}} \\ Q_{t,i} = Q_{t,i}^{\text{DG}} + Q_{t,i}^{\text{FID}} + Q_{t,i}^{\text{L}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{t,i}^{\text{DG}}$ 、 $P_{t,i}^{\text{FID}}$ 、 $P_{t,i}^{\text{L}}$ 和 $Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{FID}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{L}}$ 分别为 t 时段DG、FID、负荷注入节点 i 的有功功率和无功功率。

3)DG出力约束。

$$\sqrt{(P_{t,i}^{\text{DG}})^2 + (Q_{t,i}^{\text{DG}})^2} \leq S_i^{\text{DG}} \quad (9)$$

$$\sum_i P_{t,i}^{\text{DG}} \leq \lambda_{\max} P_{t,E} \quad (10)$$

式中: $P_{t,i}^{\text{DG}}$ 、 $Q_{t,i}^{\text{DG}}$ 分别为 t 时段节点 i 处DG实际发出的有功功率和无功功率; S_i^{DG} 为节点 i 处DG的额定容量; λ_{\max} 为系统最大允许DG渗透率; $P_{t,E}$ 为 t 时段系统的额定功率。

4)FID运行约束。

本文分别选取 PQ - PQ - $V_{\text{dc}}Q$ (PQ 和 $V_{\text{dc}}Q$ 分别表示定有功、无功功率和定直流电压、定无功功率)控制方式作为三端FID的控制方式。FID的运行约束包括各端口传输功率平衡、传输容量约束以及运行效率约束,其可表示为:

$$P_{t,\text{acx}}^{\text{FID}_x} + P_t^{\text{FID}_x,\text{L}} + P_{t,\text{dcx}}^{\text{FID}_x} = 0 \quad (11)$$

$$P_t^{\text{FID}_x,\text{L}} = (\xi_{t,\text{igbt}} + \xi_{t,\text{T}}) P_t^{\text{FID}_x} \quad (12)$$

$$\sqrt{(P_t^{\text{FID}_x})^2 + (Q_t^{\text{FID}_x})^2} \leq S^{\text{FID}_x} \quad (13)$$

$$\xi_{t,\text{igbt}} + \xi_{t,\text{T}} \leq \xi_{\max} \quad (14)$$

式中: $P_{t,\text{acx}}^{\text{FID}_x}$ 、 $P_{t,\text{dcx}}^{\text{FID}_x}$ 分别为 t 时段与交流馈线 x 相连的FID端口注入交流、直流网络的有功功率; $P_t^{\text{FID}_x,\text{L}}$ 为 t 时段与交流馈线 x 相连换流器的有功功率损耗; $P_t^{\text{FID}_x}$ 、 $Q_t^{\text{FID}_x}$ 、 S^{FID_x} 分别为 t 时段与交流馈线 x 相连换流器传输的有功、无功功率和额定容量; $\xi_{t,\text{igbt}}$ 、 $\xi_{t,\text{T}}$ 和 ξ_{\max} 分别为 t 时段换流阀、换流变压器的损耗率和FID最大允许损耗率。

3.2 系统检修运行方式优化模型

3.2.1 目标函数

系统依据第一阶段优化模型可确定不同运行方式下FID传输功率及损耗成本时序曲线。第二阶段考虑以系统检修日内全天的损耗成本最低协调各时段运行方式的投入状态,进而确定DCCB最优的检修时段,因此本文考虑引入开关函数表征运行方式投入状态,优化模型如式(15)所示。

$$\min C_T = \sum_{t=1}^T S(t) \mathbf{F}^T(t) \quad (15)$$

式中: T 为优化周期; C_T 为 T 内总损耗成本值; $S(t) = [s_1(t), s_2(t), \dots, s_o(t)]$ 为 t 时段内运行方式的开关向量, $\mathbf{F}(t) = [f_1(t), f_2(t), \dots, f_o(t)]$ 为 t 时段运行方式的损耗成本向量, O 为运行方式总数。

3.2.2 约束条件

检修日内每个时段系统只能运行于某一种运行方式,且需对直流多端网络内所有DCCB进行检修。为保证检修期间系统运行的稳定性,需对单次检修时间以及检修后系统恢复稳定运行的最短时间进行约束,约束条件如式(16)所示。

$$\text{s.t.} \begin{cases} \sum_{y=1}^O s_y(t) = 1, \quad s_y(t)(1-s_y(t)) = 0 \\ f_y(t) = F_{\text{sys},y}(t) \quad y=1, 2, \dots, O \\ t_{\text{sge}} = N_{\text{DCCB}} t_{\text{rec}} \leq t_{\text{sge,max}} \\ \Delta t_{\text{inter}} \geq t_{\text{min}} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $s_y(t)$ 为 t 时段内第 y 种运行方式的投入状态,其值为0代表未投入,其值为1代表已投入; $f_y(t)$ 为 t 时段内第 y 种运行方式的系统损耗成本,由第一阶段确定; t_{rec} 为单台DCCB检修时间; N_{DCCB} 为DCCB检修台数; t_{sge} 为单次检修时间; $t_{\text{sge,max}}$ 为单次检修最大允许时长; t_{min} 为最小允许检修时间间隔; Δt_{inter} 为相邻2次检修时的运行方式的时间间隔。

3.3 求解算法

针对传统PSO存在易陷入局部最优、算法后期粒子停滞的缺点,针对系统经济时序优化模型的非线性以及连续性,考虑采用LDW改进惯性权重,采用非线性反余弦函数修正学习因子,如式(17)、(18)所示,其可增强算法前期的全局探索能力以及后期的局部开发能力,避免收敛于局部极值点,并加快收敛速度。

$$\omega(K) = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{K_{\max}} K \quad (17)$$

$$\begin{cases} c_1 = c_{1s} + \left[1 - \frac{\arccos(M+1)}{\pi} \right] (c_{1e} - c_{1s}) \\ c_2 = c_{2s} + \left[1 - \frac{\arccos(M+1)}{\pi} \right] (c_{2e} - c_{2s}) \end{cases} \quad (18)$$

式中: ω_{\max} 、 ω_{\min} 和 ω 分别为最大、最小惯性权重值和惯性权重值; K 、 K_{\max} 分别为当前迭代次数和最大迭代次数, $M = -K/K_{\max}$; c_1 、 c_2 分别为自我、群体学习因子; c_{1s} 、 c_{1e} ($I=1, 2$)分别为学习因子 c_I 的迭代初值。

针对第二阶段的多项式0-1规划问题,本文考虑采用IEM对各时段运行方式的开关变量进行求解^[20],步骤包含:①参数读入以及函数的标准化包括目标函数极小值化,约束条件形式的变换等;②分枝定界,依据初始开关状态的目标函数值对问题进行二分枝,判定子问题是否为可行解进而决定是否继续进行分枝。

3.4 柔性互联配电网检修日经济运行优化流程

本文计及FID损耗和损伤模型建立柔性互联配电网检修日经济运行优化模型,具体的优化流程图见附录C图C1。首先基于LSE建立换流阀和换流变

压器的损耗率模型以及换流阀的损伤模型;其次结合示范工程中DCCB运行状态对运行方式进行划分;然后建立检修日经济运行优化模型:第一阶段建立以时序损耗成本最小为目标的系统经济时序优化模型;第二阶段建立以检修日内损耗成本最小为目标的系统检修运行方式优化模型;分别采用改进LDW-PSO和隐枚举法对两阶段模型进行求解,从而确定各时段FID最优传输功率、系统时序损耗成本以及DCCB最优的经济检修时段。

4 算例分析

4.1 多端FID的柔性互联系统

本文以珠海唐家湾三端直流互联拓扑结构为基准,以3个改进的IEEE 33节点系统构建柔性互联配电网,拓扑结构图见附录C图C2,通过FID将3个含多DG并网的子系统1—3末端节点18(1-18、2-18、3-18)进行互联。子系统1—3的负荷分别设置为额定负荷的1.2倍、90%的额定负荷、60%的额定负荷,系统参数和DG概率分布参数详见附录C图C3,且认为每个调控时间段DG出力的概率分布参数与负荷为定值。系统将DG和FID内换流器视为谐波源,通过建立注入谐波电流模型和谐波潮流模型求解谐波电压畸变率,具体计算模型详见附录D。子系统1的峰时([07:00,19:00])电价为668元/(MW·h),谷时([19:00,07:00])电价为378元/(MW·h);子系统2、3的峰时电价为615元/(MW·h),谷时电价为320元/(MW·h)。三端FID采用PQ-PQ-V_{dc}Q的控制方式,采用改进LWD-PSO进行求解,使用MATLAB R2018a进行编程。其中维度D=5,种群规模N_{scale}=50,惯性权重系数 $\omega \in [0.4, 0.9]$,学习因子 $c_{1s}=c_{2e}=2.5$, $c_{1e}=c_{2s}=0.5$,粒子速度范围 $v \in [-4, 4]$,最大迭代次数为100次。

4.2 系统经济时序优化计算结果

结合图2和表1,本文分别采用负载均衡和经济最优策略对以下4种方式进行对比分析:①方式1,3个子系统互联并网运行;②方式3,DCCB₂、DCCB₃检修或故障,只有子系统1、3通过直流配电网实现互联;③方式5,DCCB₁检修或故障,子系统1及子系统2、3分别为2个独立直流配电网供电实现隔离运行;④方式7,仅DCCB₄处于闭合状态,子系统1单独运行且与直流配电网实现功率传输。

方式1下FID传输功率及损耗成本对比曲线如图3所示(上图中虚线、实线分别为采用负载均衡策略、经济最优策略的各端口VSC传输功率,下同)。方式1下负载均衡策略的FID传输功率均较大,且在时段5、6之间的波动较大,导致换流阀结温波动较大,增大了其损伤成本。相比之下在经济最优策略

调控下FID全天稳定运行经济运行区间,三端联网运行提高了配电网对DG的消纳能力,在负荷峰时通过经济优化策略所降低的损耗成本更为显著。

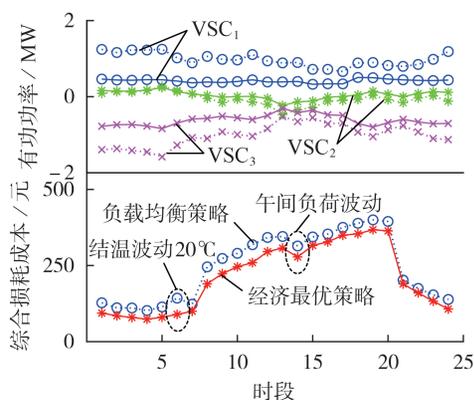


图3 方式1下FID传输功率及损耗成本对比曲线

Fig.3 Comparison curves of FID transmission power and loss cost under Mode 1

方式3、5、7下FID传输功率及损耗成本对比曲线见附录E图E1。方式3下重载子系统1与轻载子系统3互联,FID传输功率较大且与方式1大小接近,VSC₂空载运行仅作无功支撑。负载均衡策略在时段17、18间的结温波动同样较大,且白天的光伏发电功率无法有效消纳,导致的损耗成本增加,而经济最优策略下FID稳定运行于经济区间内,损耗成本显著降低。方式5下VSC₁仅传输直流微电网的负荷及DG。子系统2、3风光较为丰富,夜间子系统3富含风电,而白天子系统2富含光伏发电功率,可实现风光互补进而降低损耗成本,但时段1—5仍存在大面积弃风现象,导致损耗成本增加。经济最优策略下FID功率波动平缓,且无需FID做无功支撑而增加成本。方式7下2种策略计算结果一致,VSC₂和VSC₃仅做无功支撑,VSC₁凌晨(时段24)和正午(时段12)运行于逆变状态实现DG并网供电,傍晚(时段18)处于整流状态为直流负荷供电。时段19为满足电压要求VSC₁提供较高的无功补偿,同时系统总损耗成本也是4种运行方式中最高的。

各运行方式下节点电压幅值均在电压允许范围内,但负载均衡策略下节点电压幅值的波动显著强于经济最优策略,节点电压幅值曲线图见附录E图E2。进一步详细分析方式1下损耗成本组成成分对比图见附录E图E3,负载均衡策略和经济最优策略的损耗成本均包含直流系统、FID以及交流子系统1—3的损耗成本5个部分。2种策略下子系统1损耗成本相近,但系统总损耗成本较大,这是由于子系统3通过FID传输较大功率给子系统1,导致子系统3和FID的损耗成本增加量大于子系统1损耗成本的减小量,同时处于重载运行的FID传输功率的

波动,使得换流阀结温产生较大波动,FID的综合损耗成本进一步增大(如时段6、24)。经济最优策略下FID综合各时段运行效率显著高于负载均衡策略,且时段间的功率波动小,结温波动小,DG可被有效消纳,系统时序损耗成本显著低于负载均衡策略。

4.3 检修日内系统的最优方式切换方案

检修日需对直流多端网络内所有DCCB进行检修,设每台DCCB检修时间为2 h,检修后系统恢复稳定运行的最小时长为1 h,单次检修最大允许时长为4 h。结合运行方式的划分及第一阶段所确定的损耗成本曲线,采用枚举法求解检修日内运行方式的最优切换方案以及最低损耗成本,计算结果如表2所示,检修日内依次在时段3、4检修DCCB₁,时段6、7检修DCCB₄,时段14、15检修DCCB₃,时段20—23检修DCCB₂和DCCB₅,检修日最低损耗成本为5 110.211 0元,因检修而增加的损耗成本为40.6269元。

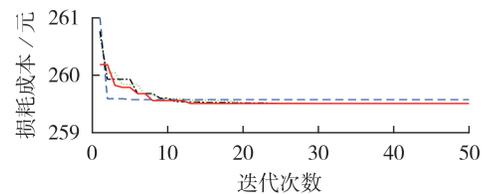
表2 检修日内系统最优运行方案及损耗成本

时段	运行方式 编号	损耗成本/ 元	时段	运行方式 编号	损耗成本/ 元
1	1	93.8655	13	1	307.3347
2	1	85.0539	14	4	287.0630
3	5	86.9307	15	4	317.9111
4	5	81.2078	16	1	327.5312
5	1	80.1857	17	1	349.4035
6	2	97.9157	18	1	354.1444
7	2	106.6605	19	1	367.6490
8	1	189.8386	20	3	363.3657
9	1	223.4902	21	3	189.1982
10	1	245.8774	22	3	160.1953
11	1	259.5020	23	3	133.0889
12	1	295.5749	24	1	107.2231

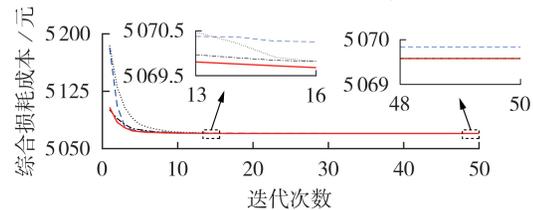
4.4 优化算法对比分析

本文分别采用PSO、遗传算法(GA)、LDW-PSO以及改进LDW-PSO对运行方式1进行求解。计算结果如图4所示,前50次迭代中在时段11内PSO出现局部收敛现象如图4(a)所示,计算结果不准,GA全天的平均迭代次数最大如图4(b)所示,收敛速度最慢,LDW-PSO整体的收敛速度低于本文改进LDW-PSO收敛速度。结合附录E图E4所示粒子的迭代分布图可知,改进LDW-PSO相比于传统LDW-PSO其前期全局搜索能力更强,后期局部搜索速度更快。

4种算法计算结果对比如表3所示。由表可知,本文算法迭代次数少,避免了局部收敛,计算结果准确,且计算速度较PSO、GA、传统LDW-PSO分别提高37.54%、52.74%、7.20%,粒子前后期具有较强的极值寻优能力。



(a) 时段11损耗成本迭代曲线



(b) 综合损耗成本迭代曲线

--- PSO, ---- LDW-PSO, GA, —— 改进LDW-PSO

图4 算法收敛曲线对比

Fig.4 Comparison of convergence curve of algorithms

表3 算法计算结果对比

Table 3 Comparison of calculation results of each algorithm

优化算法	平均迭代 次数	损耗成本/ 元	平均迭代 时间/s
PSO	18.1814	5 069.8832	84.5486
GA	29.8333	5 069.5841	111.7507
LDW-PSO	15.0417	5 069.5832	56.9050
本文改进LDW-PSO	13.9583	5 069.5829	52.8063

5 结论

针对现有研究未考虑FID的损耗和损伤对柔性互联配电网经济运行的影响,也未涉及检修日内设备检修运行方式优化策略,本文开展以下工作。

1)基于仿真分析可知换流阀损耗率随负载率的增加而增加,换流变压器损耗率随负载率增加呈现先降后升的趋势,结合换流阀的损伤系数模型,建立了FID的综合损耗模型。

2)建立柔性互联配电网检修日两阶段经济运行优化模型,较负载均衡策略该模型下FID功率输出平缓,结温波动小,运行效率高,时序损耗成本显著降低。多运行方式中三端互联方式下的综合损耗成本最小,系统时序损耗成本最小。基于检修日运行方式的切换,确定了DCCB的经济检修时段及检修日最低损耗成本,为设备检修提供一定的经济指导。

3)本文对传统PSO算法进行改进,相较于传统算法其迭代次数少、可有效避免局部收敛,计算结果准确,计算效率高。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] LI P,JI H R,WANG C S,et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point[J]. IEEE Transactions on Sus-

- tainable Energy, 2017, 8(4):1430-1442.
- [2] 段青,沙广林,盛万兴,等. 配电网柔性互联系统多模式运行及其调控策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(11):9-24.
DUAN Qing, SHA Guanglin, SHENG Wanxing, et al. Multi-mode operation and its control strategy of flexible interconnected system for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11):9-24.
- [3] LI P, JI H R, WANG C S, et al. Optimal operation of soft open points in active distribution networks under three-phase unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(1):380-391.
- [4] CAO W Y, WU J Z, JENKINS N, et al. Benefits analysis of soft open points for electrical distribution network operation[J]. Applied Energy, 2016, 165:36-47.
- [5] 杨万里,涂春鸣,兰征,等. 基于储能型柔性多状态开关的直流微电网与交流配电网柔性互联策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(5):254-260.
YANG Wanli, TU Chunming, LAN Zheng, et al. Flexible interconnection strategy between DC microgrid and AC distribution grid based on energy storage flexible multi-state switch[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(5):254-260.
- [6] 祁琪,姜齐荣,许彦平. 智能配电网柔性互联研究现状及发展趋势[J]. 电网技术, 2020, 44(12):4664-4676.
QI Qi, JIANG Qirong, XU Yanping. Research status and development prospect of flexible interconnection for smart distribution networks[J]. Power System Technology, 2020, 44(12):4664-4676.
- [7] 曹华珍,王天霖,张黎明,等. 基于组合赋权-TOPSIS交直流配电网能效评估[J]. 南方电网技术, 2021, 15(3):55-67.
CAO Huazhen, WANG Tianlin, ZHANG Liming, et al. Energy efficiency evaluation of AC/DC distribution network based on combined weighting TOPSIS[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(3):55-67.
- [8] 王希平,李志刚,姚芳. 模块化多电平换流阀IGBT器件功率损耗计算与结温探测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(8):1636-1646.
WANG Xiping, LI Zhigang, YAO Fang. Power loss calculation and junction temperature detection of IGBT devices for modular multilevel valve[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(8):1636-1646.
- [9] 陈民铀,陈一高,高兵,等. 计及焊料层疲劳累积效应的IGBT模块寿命评估[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(20):6053-6061.
CHEN Minyou, CHEN Yigao, GAO Bing, et al. Lifetime evaluation of IGBT module considering fatigue accumulation of solder layers[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(20):6053-6061.
- [10] 徐全,袁智勇,于力,等. 基于多端SOP的交直流混合配电网多目标运行优化方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(9):42-48, 54.
XU Quan, YUAN Zhiyong, YU Li, et al. Multi-objective optimal operation method for AC/DC hybrid distribution network based on multi-terminal SOP[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(9):42-48, 54.
- [11] 张博,唐巍,丛鹏伟,等. 基于SOP和VSC的交直流混合配电网多时间尺度优化控制[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(9):11-19.
ZHANG Bo, TANG Wei, CONG Pengwei, et al. Multi-time scale optimal control in hybrid AC/DC distribution networks based on SOP and VSC[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(9):11-19.
- [12] 褚国伟,张友旺,葛乐,等. 自储能柔性互联配电网多时间尺度电压优化[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9):71-79.
CHU Guowei, ZHANG Youwang, GE Le, et al. Multi-time-scale voltage optimization of flexible interconnected distribution network with self-energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9):71-79.
- [13] 白浩,于力,姜臻,等. 基于四端E-SOP的有源配电网运行效率优化[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(3):89-98.
BAI Hao, YU Li, JIANG Zhen, et al. Operating efficiency optimization for active distribution network based on four-terminal E-SOPs[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(3):89-98.
- [14] 丛鹏伟,唐巍,姜铨伟,等. 含高渗透率可再生能源的主动配电网两阶段柔性软开关与联络开关协调优化控制[J]. 电工技术学报, 2019, 34(6):1263-1272.
CONG Pengwei, TANG Wei, LOU Chengwei, et al. Two-stage coordination optimization control of soft open point and tie switch in active distribution network with high penetration renewable energy generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(6):1263-1272.
- [15] 简力,袁旭峰,熊炜,等. 计及SOP柔性互联配电网经济性重构优化研究[J]. 电力科学与工程, 2020, 36(12):1-7.
JIAN Li, YUAN Xufeng, XIONG Wei, et al. Research on optimization of economic reconfiguration of flexible interconnected distribution network considering SOP[J]. Electric Power Science and Engineering, 2020, 36(12):1-7.
- [16] 郑志宇,李石东,凌毓畅,等. 中低压直流配电网线损计算与分析[J]. 电测与仪表, 2019, 56(3):23-28.
ZHENG Zhiyu, LI Shidong, LING Yuchang, et al. Calculation and analysis of line loss of medium-low voltage DC distribution network[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(3):23-28.
- [17] 王海田,汤广福,贺之渊,等. 模块化多电平换流器的损耗计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(2):112-118.
WANG Haitian, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. Power losses calculation of modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(2):112-118.
- [18] 周远翔,刘心曲,王明渊,等. 换流变压器损耗现场测试影响因素及仿真[J]. 高电压技术, 2016, 42(5):1608-1616.
ZHOU Yuanxiang, LIU Xinqu, WANG Mingyuan, et al. Influence factor and simulation of the loss of the converter transformer on-site testing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5):1608-1616.
- [19] 赵真,袁旭峰,艾小清,等. 柔性互联配电网概率潮流算法研究[J/OL]. 电测与仪表. [2021-09-05]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20210329.1629.005.html>.
- [20] 刘世奇. 基于隐枚举法的输电线路机械除冰次序优化[D]. 南京:南京理工大学, 2017.
LIU Shiqi. Implicit enumeration based sequence optimization of mechanical de-icing on transmission line[D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2017.

作者简介:



张真

张真(1996—),男,硕士研究生,主要研究方向为柔性互联配电网能效评估及优化(E-mail:1754211353@qq.com);

欧阳森(1973—),男,副研究员,博士,主要研究方向为配电网电能质量、节能技术与智能电器(E-mail:ouyangs@scut.edu.cn);

杨墨缘(1997—),男,硕士研究生,主要研究方向为交直流配电网规划与可靠性评估(E-mail:1243341584@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

(下转第161页 continued on page 161)

L-R hybrid bridge DC / DC converter

YUAN Yisheng, PENG Neng, LIU Wei

(School of Electrical and Automation Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: An L-R hybrid bridge DC / DC converter is proposed. Based on the traditional half-bridge LLC resonant converter, the proposed converter only adds a group of L-bridge arms and has HG (High voltage Gain) and LG (Low voltage Gain) modes. In HG mode, PWM (Pulse Width Modulation) is used and the linear energy storage of inductor is achieved through L-bridge arm, so as to obtain higher voltage gain and wider output voltage range compared with traditional LLC resonant converter. The voltage gain is less affected by excitation inductor, and the circuit works without feedback current. In LG mode, PFM (Pulse Frequency Modulation) is adopted, and the voltage gain characteristic is close to that of traditional LLC resonant converter, while the feedback current and circulating current are smaller. The working principles of the two voltage gain modes of the proposed topology are analyzed in detail, and the gain formula is derived and compared with traditional topology. Finally, an experimental prototype with an input voltage of 220 V and an output voltage of 100~160 V is built, and the experimental results verify the correctness of theoretical analysis.

Key words: DC / DC converter; resonance; hybrid; high voltage gain; wide range output

(上接第153页 continued from page 153)

Optimal strategy of economic operation for flexible interconnected distribution network in maintenance day considering FID comprehensive loss

ZHANG Zhen, OUYANG Sen, YANG Moyuan, WU Han

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Aiming at the problem that the load balancing strategy does not consider the impact of the FID (Flexible Interconnection Device) comprehensive loss on economic operation, and does not involve the optimal problem of economic operation mode in maintenance day. Firstly, based on the simulation, the LES (Least Square Estimation method) is used to establish the loss rate model of converter valve and converter transformer, and the damage coefficient model of converter valve. Secondly, combined with the topology of three-terminal flexible interconnected distribution network in the demonstration project, the system operation modes are divided according to the operation state of DCCB (DC Circuit Breaker). Then, the two-stage economic operation optimal model in maintenance day is established. In the first stage, the economic time series optimal model is established with the objective of minimizing the loss cost of each period. In the second stage, the optimal model of operation mode in maintenance day is established with the objective of minimizing the loss cost of DCCB maintenance day. The improved LDW-PSO (Linear Descend Weight-Particle Swarm Optimal method) and IEM (Implicit Enumeration Method) are used to solve the two-stage model. Finally, the example results show that the optimal strategy can quickly and accurately calculate the system time series loss cost, effectively reduce the loss cost in maintenance day and provide economic guidance for maintenance.

Key words: FID comprehensive loss; economic operation; DCCB maintenance; improved LDW-PSO; flexible interconnected distribution network

附录 A

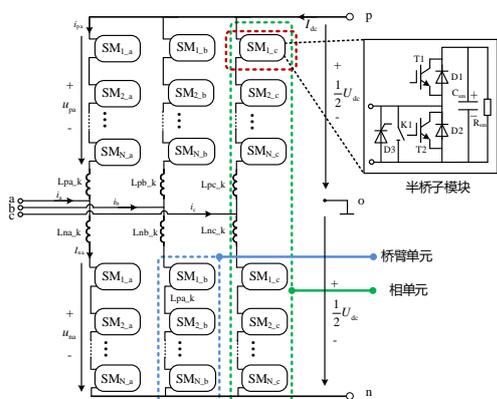


图 A1 IGBT 换流阀拓扑结构图

Fig.A1 Topology structure diagram of IGBT converter valve

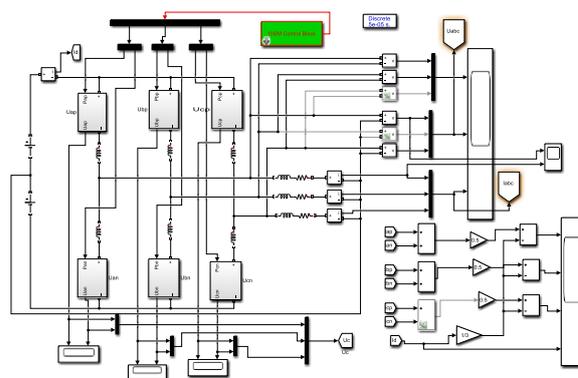


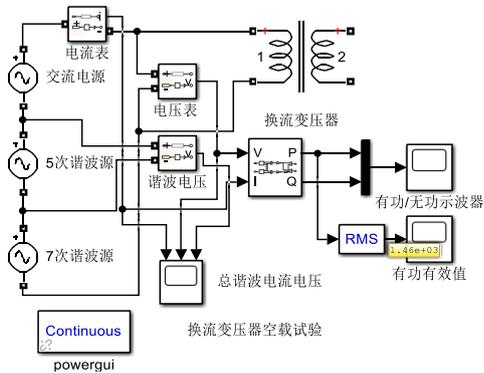
图 A2 半桥型 IGBT 换流阀损耗仿真模型

Fig.A2 Loss simulation model of half-bridge IGBT converter valve

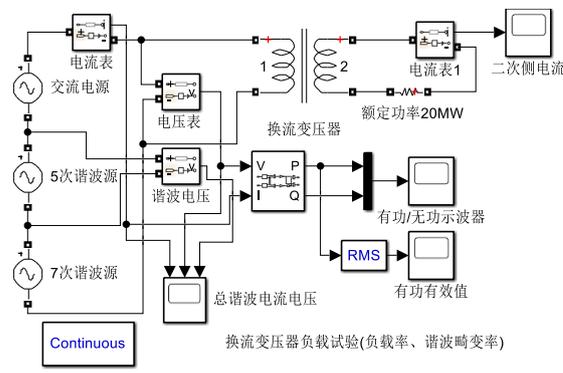
表 A1 半桥型 IGBT 换流阀仿真参数

Table A1 Simulation parameters of half-bridge IGBT converter valve

参数	数值	参数	数值
额定容量/(MV·A)	2	每桥臂总模块数	28
额定直流电压/kV	10	每桥臂冗余模块数	3
网侧额定电压/kV	10	桥臂电感 L/mH	112
阀侧额定电压/kV	8.6	模块电容 C/mF	21.5
换流变压器变比	10/8.6	控制频率/kHz	10



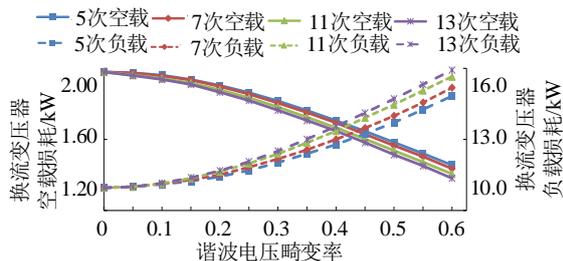
(a)时段 11 迭代曲线



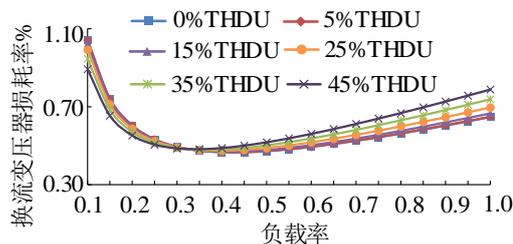
(b)全天综合迭代曲线

图 A3 换流变压器空负载损耗仿真模型

Fig.A3 Simulation model of no load and load loss of converter transformer



(a)谐波对空负载损耗的影响



(b)负载率和谐波对总损耗的影响

图 A4 换流变压器的损耗仿真曲线

Fig.A4 Loss simulation curve of converter transformer

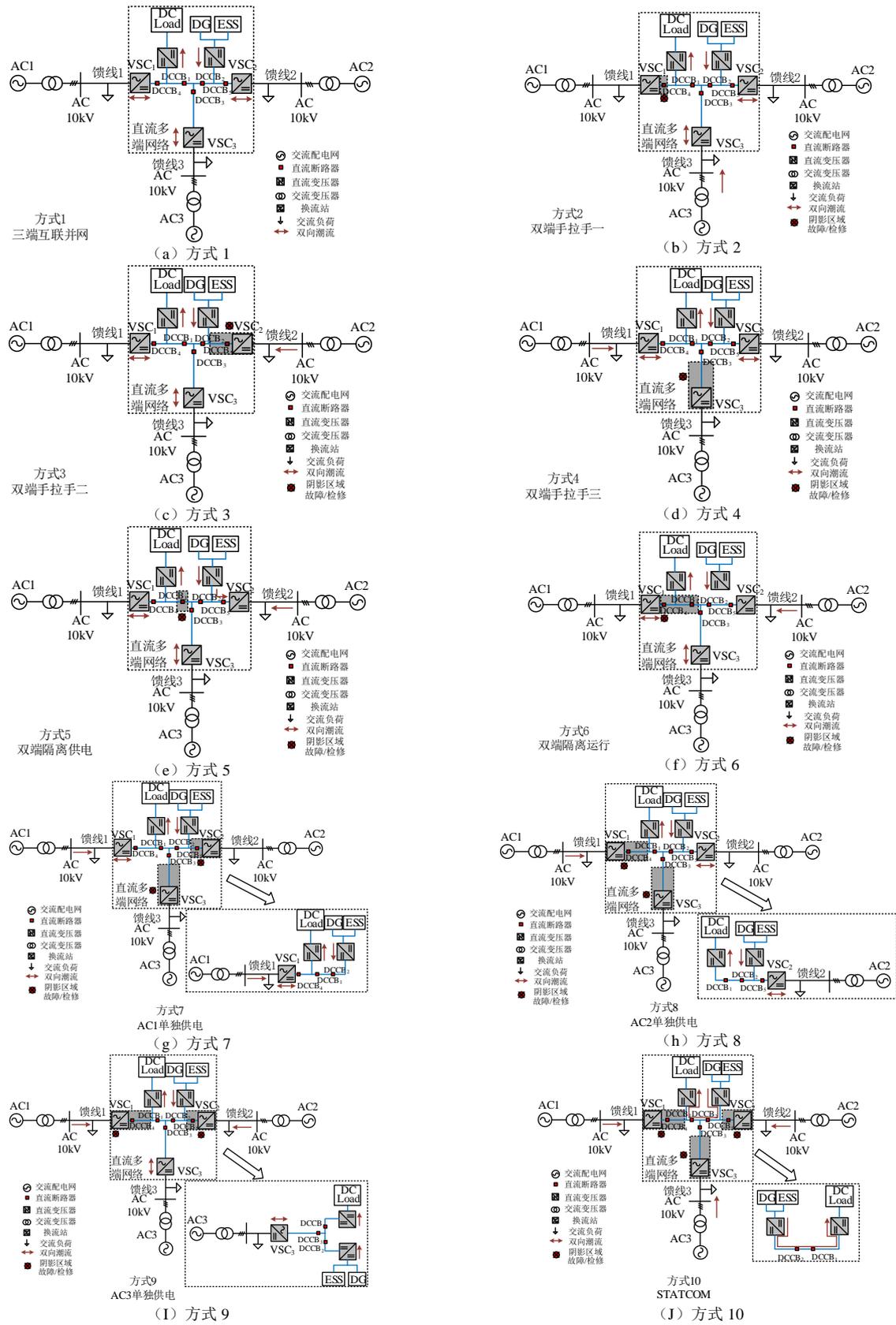


Fig.A5 Ten kinds of operation methods of AC/DC hybrid flexible interconnected distribution network based on FID

附录 B

交直流潮流计算模型为:

$$\begin{cases} P_{aci} = U_{aci} \sum_{j=1}^{N_{ac}} U_{acj} (G_{ij} \cos \delta_{ij} + B_{ij} \sin \delta_{ij}) \\ Q_{aci} = U_{aci} \sum_{j=1}^{N_{ac}} U_{acj} (G_{ij} \sin \delta_{ij} - B_{ij} \cos \delta_{ij}) \\ P_{c,dcx} = -P_{c,acx} - P_{c,lossx} \\ P_{dci} = \sum_{j=1}^{N_{dc}} Y_{ij} U_{dcj} U_{dci} \end{cases} \quad (B1)$$

式中: P_{aci} 、 Q_{aci} 分别为交流节点 i 的注入有功功率和无功功率; U_{aci} 、 δ_i 分别为交流节点 i 的电压幅值和相角; $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$; G_{ij} 、 B_{ij} 分别为节点导纳矩阵中元素的电导和电纳; N_{ac} 、 N_{dc} 分别为交流节点个数和直流节点个数; $P_{c,acx}$ 、 $P_{c,dcx}$ 分别为与馈线 x 相连的换流器注入交流系统和直流系统的有功; $P_{c,lossx}$ 为对应换流器损耗; P_{dci} 、 U_{dci} 分别为直流节点 i 的注入有功和节点电压幅值; Y_{ij} 为直流系统节点导纳矩阵。

三点估计法模型为:

$$\begin{cases} \xi_{\chi\mu,v} = -\frac{\lambda_{\mu,3}}{2} + (-1)^{3-v} \sqrt{\lambda_{\mu,4} + \frac{3}{4} \lambda_{\mu,3}^2} \\ \xi_{\chi\mu,3} = 0 \\ p_{\chi\mu,v} = \frac{(-1)^{3-v}}{\xi_{\chi\mu,v} (\xi_{\chi\mu,1} - \xi_{\chi\mu,2})} \\ p_{\chi\mu,3} = \frac{1}{\lambda_{\mu,4} - \lambda_{\mu,3}^2} \end{cases} \quad \nu = 1, 2 \quad (B2)$$

式中: $\xi_{\chi\mu,v}$ 、 $p_{\chi\mu,v}$ 分别为 3 点估计法的位置与权重系数, 下标 $\chi\mu$ 表示第 μ 为随机变量; $\lambda_{\mu,3}$ 和 $\lambda_{\mu,4}$ 分别为 3 阶和 4 阶标准化中心矩, 分别取值为 0、3; ν 为点估计数。

附录 C

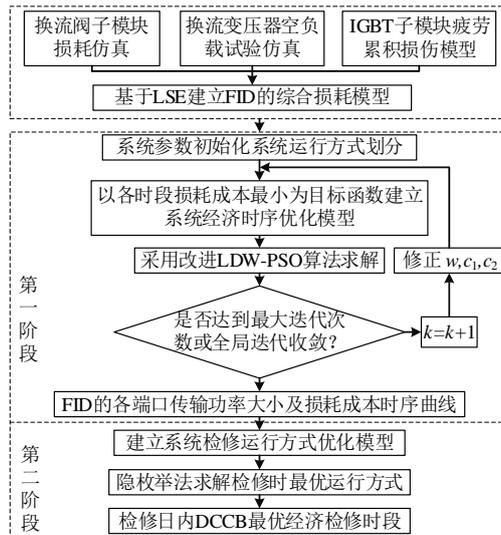


图 C1 柔性互联配电网检修日经济运行优化流程图

Fig.C1 Optimization flowchart of daily economic operation of flexible interconnected distribution network

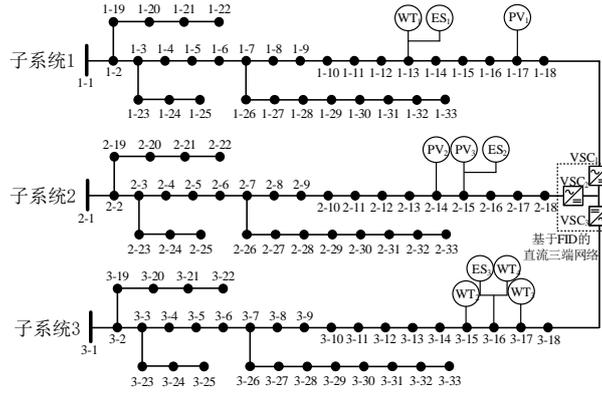
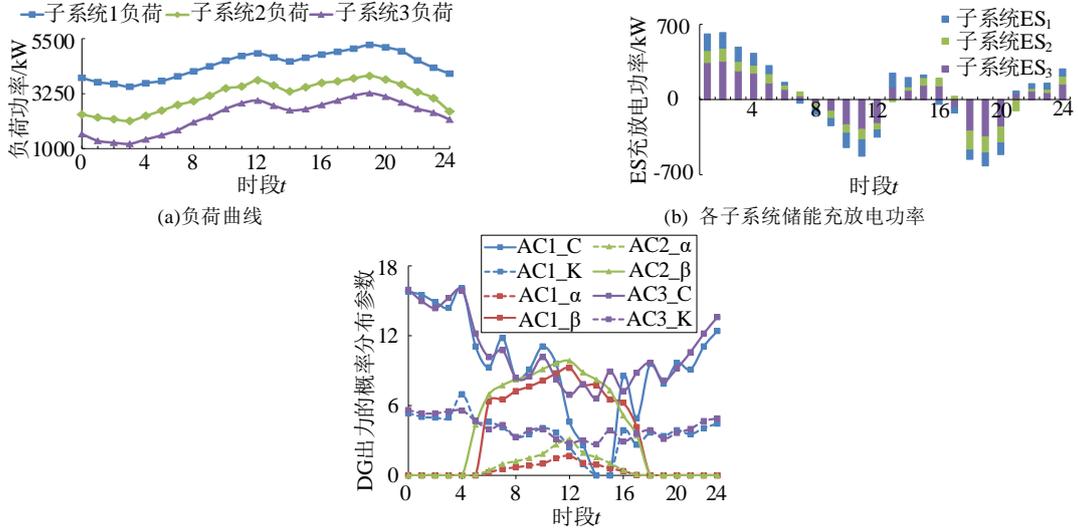


图 C2 基于改进 IEEE 33 节点的柔性互联配电网
Fig.C2 Flexible interconnected system based on improved IEEE 33 node



(a) 负荷曲线
(b) 各子系统储能充放电功率
(c) DG 出力的概率分布系数曲线
图 C3 负荷、DG 以及储能典型日全天预测曲线
Fig.C3 Forecast curves of load, DG and energy storage during typical daily all day

附录 D

DG 并网逆变器注入谐波电流模型为:

$$I_{hm} = \frac{I_{1m}}{(h-5/h) \times 1.2} \quad h = 5, 7, 11, 13 \quad (D1)$$

式中: I_{1m} 、 I_{hm} 分别为基波和 h 次谐波电流幅值。

FID 内部换流器注入谐波电流模型为:

$$f_h(\beta_{FID}) = b_{h0} + b_{h1} \cos(\tau_h \beta_{FID}) + b_{h2} \sin(\tau_h \beta_{FID}) \quad (D2)$$

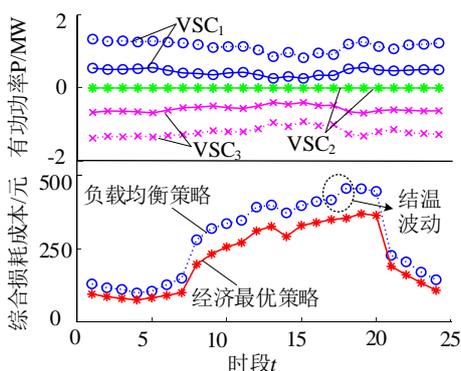
式中: $f_h(\cdot)$ 为 h 次谐波电流含有率分布函数, 表征 I_{1m} 与 I_{hm} 的比值; β_{SOP} 为 FID 内换流器的负载率; $b_{hi} (i=1, 2, 3)$ 为 h 次谐波电流含有率波形的展开系数; τ_h 为波形振荡频率。

节点电压畸变率计算模型为:

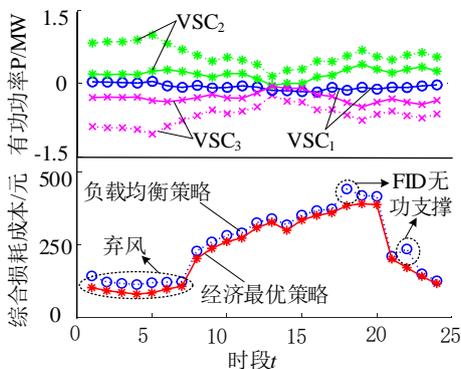
$$\begin{cases} U_h = Y_h^{-1} I_h \\ U_{\text{THD}} = \sqrt{\sum_{i=3}^h U_i^2} / U_1 \end{cases} \quad h = 5, 7, 11, 13 \quad (\text{D3})$$

式中： I_h 为 h 次谐波注入电流； U_h 为节点的 h 次谐波电压； Y_h^{-1} 为 h 次谐波节点导纳矩阵的逆， U_{THD} 为各节点的谐波电压畸变率。

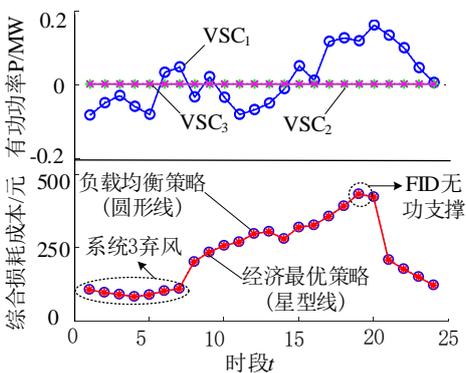
附录 E



(a) 方式 3 下 FID 传输功率及损耗成本对比曲线



(b) 方式 5 下 FID 传输功率及损耗成本对比曲线



(c) 方式 7 下 FID 传输功率及损耗成本对比曲线

图 E1 FID 传输功率及损耗成本对比曲线

Fig.E1 FID transmission power and loss cost curve

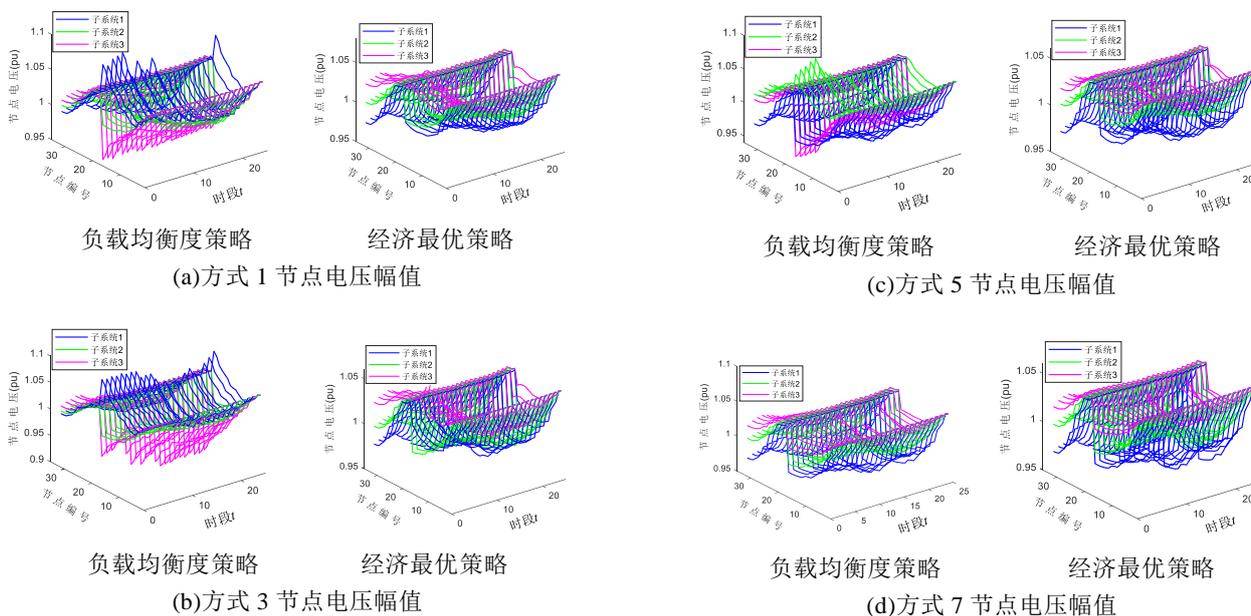


图 E2 节点电压幅值曲线图

Fig.E2 Diagrams of node voltage amplitude curve

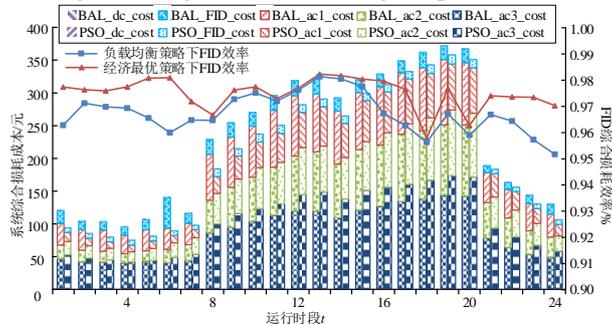


图 E3 方式 1 系统综合损耗成本组成成分对比图

Fig.E3 Comparison chart of system comprehensive loss cost components under Scenario 1

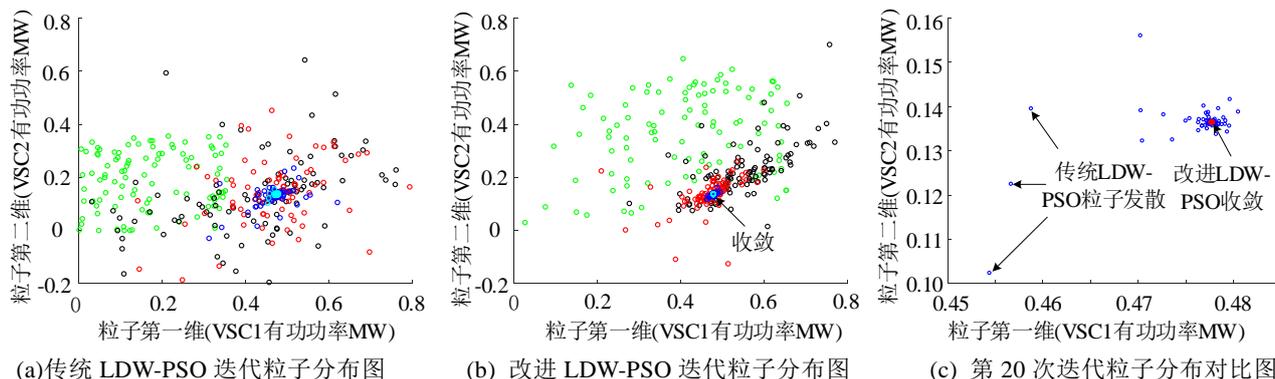


图 E4 运行方式 1 第 1 时段部分迭代次数粒子分布图

Fig.E4 Particle distribution of partial iterations in the first period of operation mode 1