

基于并查集的柔性多状态开关定容方法

林湘宁¹,李卓¹,叶雨晴¹,马啸¹,王子璇¹,许烽²,王朝亮²

(1. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室,湖北 武汉 430074;

2. 国网浙江省电力有限公司电力科学研究院,浙江 杭州 310014)

摘要:柔性多状态开关(FMSS)作为配电网改造中的重要电力电子元件,因成本较高和相关技术的不成熟,尚未得到广泛应用。为合理规划FMSS的容量,同时兼顾配电网经济性和供电可靠性,以年均总成本最小为优化目标,建立了含新能源配电网的综合成本评价模型,并应用粒子群优化算法进行求解。为考虑FMSS运行模式的动态切换,等效简化了复杂工况下FMSS的工作模式,引入并查集算法以快速、有效地确定FMSS实时运行模式,大幅提升了定容问题的求解速度,克服了现有优化配置方案对FMSS运行策略多样性和动态性考虑不够充分的缺陷。IEEE 14节点和IEEE 33节点互联配电系统的多组对比仿真结果表明,所提方法在求解速度上有一定的优越性,优化所得方案能促进新能源消纳,提高配电网供电可靠性,且具备良好的经济效益。

关键词:配电网;柔性多状态开关;容量规划;并查集;经济性;可靠性

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006003

0 引言

目前,我国新能源渗透率不断提高,配电网的供电可靠性和电能质量面临挑战。为进一步提高新能源消纳水平,推动我国电力产业转型发展,亟需针对市场机制不健全、供需发展不平衡、跨区跨省调节难度大等问题提出相应的解决办法^[1]。其中,对于技术层面而言,在获得了有关部门给予的强有力政策支持后,如何改变省内平衡和就地消纳为主的供需现状,扩大新能源优化配置范围,促进剩余功率的跨区域消纳,已成为一项重要的研究内容^[2-3]。

柔性多状态开关(FMSS)是一种新型的电力电子开关设备,具备多种控制模式,可用于代替配电网中的常规开关以实现系统的柔性互联。通过对其传输功率和端口电压进行可控调节,能够发挥其在电能质量治理、馈线负荷均衡、分布式电源(DG)消纳等方面的独特优势,改善我国当前配电网网架较为薄弱、自动化水平相对落后的运行现状^[4-5]。目前,国内外针对FMSS的研究工作主要围绕其运行特性^[6]、故障恢复^[7]、运行优化^[8]、优化配置^[9-11]等方面展开。考虑到FMSS的实现主要依赖于成本较高的全控型电力电子装置,其容量的合理规划将有助于降低建设和运行成本,实现综合效益的最大化。

文献[9]在总结柔性直流设备特点的基础上,应用熵权法构建一种适用于柔性直流设备的选址定容模型,避免了人为设置权重的主观干扰。文献[10]

提出一种有源配电网DG与FMSS三层协调规划模型,采用场景分析法体现了DG与负荷的随机性,基于并行遗传算法和锥规划进行求解,获得了FMSS的优化配置方案。文献[11]利用一个整数变量同时表征FMSS的安装位置和容量,以优化多类经济指标为目标,建立了针对FMSS选址定容问题的双层规划模型,并在求解算法方面提出了一种模拟退火和锥规划的混合优化算法。上述研究对后来者很具有启发性和借鉴意义,但鲜有涉及FMSS运行策略时序性和动态性的分析,未能深入探究配电网各类复杂工况对FMSS工作模式的影响。在实际运行过程中,FMSS会根据系统的实时拓扑和故障是否发生相应地调整其工作模式,改变系统潮流,继而影响配电网中的各项经济性和可靠性指标。

针对上述不足,本文基于等效原理对FMSS的工作模式做出合理简化,应用图论中的并查集算法对不同场景下各FMSS实际的工作模式进行快速判断。在此基础上,为实现兼顾系统经济性和可靠性的FMSS的容量规划,本文建立了计及FMSS投资成本、维护成本、配电网网损成本、停电经济损失和弃风/弃光损失的互联配电网年均总成本评价模型。为考虑FMSS工作模式的动态切换,提出了一种结合粒子群优化算法和并查集算法的FMSS定容问题求解算法。最后通过算例分析,验证了所提方法的有效性和快速性。

1 FMSS工作模式和约束条件

FMSS通常由全控型功率器件构成,如绝缘栅双极型晶体管(IGBT),背靠背电压源型变流器(B2B VSC)是FMSS的主要实现形式。以二端口FMSS为例,其主电路拓扑如图1所示。

收稿日期:2019-11-04;修回日期:2020-04-02

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903100);国家电网公司科技项目(521104170043)

Project supported by the National Key R&D Program of China(2017YFB0903100) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(521104170043)

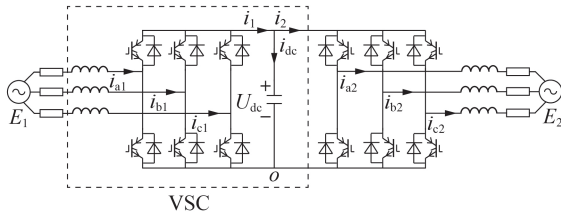


图1 二端口FMSS主电路拓扑

Fig.1 Main circuit topology of two-terminal FMSS

图1中,单个电压源型变流器(VSC)由换流阀、阀电抗器、直流电容器等元件构成。通过控制IGBT的有序通断可实现既定目标的交直流变换;反向并联二极管的主要功能是反向续流和防止过电压;阀电抗器和直流电容器则分别用于变流器与交流侧之间的能量交换和支撑变流器的直流侧电压。

1.1 工作模式

FMSS各端口VSC的主要控制模式如表1所示。

表1 VSC控制模式

Table 1 Control modes of VSC

控制模式	应用场景
有功功率控制 (P控制)	基于有功调度指令优化潮流分布
无功功率控制 (Q控制)	基于无功调度指令改善电压质量
直流电压控制 (V _{dc} 控制)	稳定直流电压,平衡多个端口间的有功功率
交流电压控制 (V _{ac} 控制)	调整某个端口出线母线上的交流电压
恒频恒压控制 (V/f控制)	故障恢复过程中故障侧失电或向无源系统供电时,充当恒压恒频电源

特别地,对于二端口FMSS,当双端均与有源系统相连时,需有一侧变流器(记作端口1)参与直流电压 U_{dc} 的控制,同时加入 V_{ac} 控制或Q控制;另一侧变流器(记作端口2)在对有功功率 P 进行控制的同时,同样需要参与 V_{ac} 控制或Q控制。而当FMSS一端与无源系统相连时,该端口(记作端口1)采用V/f控制。由此得到二端口FMSS的6种工作模式见表2。

表2 二端口FMSS工作模式

Table 2 Operating modes of two-terminal FMSS

连接状态	端口1控制模式	端口2控制模式
双端均与有源系统相连	V _{dc} V _{ac} 控制	PV _{ac} 控制
	V _{dc} V _{ac} 控制	PQ控制
	V _{dc} Q控制	PV _{ac} 控制
	V _{dc} Q控制	PQ控制
一端向无源负荷供电	V/f控制	V _{dc} V _{ac} 控制
	V/f控制	V _{dc} Q控制

1.2 约束条件

为保障有功功率的持续传输和装置的稳定运行,二端口FMSS的相关电气量须满足以下约束条件。

(1)FMSS有功功率等式约束^[11]。

$$\begin{cases} P_{i1} + P_{i2} + P_i^{\text{loss}} = 0 \\ P_i^{\text{loss}} = A_{i1}|P_{i1}| + A_{i2}|P_{i2}| \end{cases} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

其中, P_{i1} 和 P_{i2} 为第 i 个FMSS两端流入系统的有功功率; P_i^{loss} 为第 i 个FMSS的传输损耗; A_{i1} 和 A_{i2} 为第 i 个FMSS相应端口的损耗系数; n 为配电网中FMSS的安装总数。

需要说明的是,FMSS的功率传输效率还与载荷大小有关。尽管在轻载时效率较低,但损耗也较小,故综合采用一个合适的效率值对规划结果影响不大。为降低问题的复杂性,本文统一选取损耗系数为0.2。

(2)电压约束。

$$U_{il}^{\min} \leq U_{il} \leq U_{il}^{\max} \quad l = 1, 2 \quad (2)$$

其中, U_{il} 为第 i 个FMSS端口 l 处的节点电压; U_{il}^{\max} 和 U_{il}^{\min} 分别为第 i 个FMSS端口 l 处电压的上、下限。

(3)电流约束。

$$I_{il} \leq I_{il}^{\max} \quad (3)$$

其中, I_{il} 和 I_{il}^{\max} 分别为流经第 i 个FMSS端口 l 的电流实际值与最大允许值。

(4)功率不等式约束。

$$\begin{cases} P_{il}^{\min} \leq P_{il} \leq P_{il}^{\max} \\ Q_{il}^{\min} \leq Q_{il} \leq Q_{il}^{\max} \\ P_{il}^2 + Q_{il}^2 \leq (S_{il}^{\max})^2 \end{cases} \quad l = 1, 2 \quad (4)$$

其中, P_{il} 和 Q_{il} 分别为第 i 个FMSS端口 l 输出的有功功率和无功功率; P_{il}^{\max} 、 P_{il}^{\min} 和 Q_{il}^{\max} 、 Q_{il}^{\min} 分别为第 i 个FMSS端口 l 允许输出的有功功率上、下限和无功功率上、下限; S_{il}^{\max} 为第 i 个FMSS端口 l 的视在功率上限。式(4)将FMSS的有功功率、无功功率和视在功率限制在允许的运行范围内。

2 FMSS的分层定容策略

2.1 综合成本评价模型

为定量分析FMSS接入后互联配电网的经济效益,构建如式(5)所示的规划期内年均总成本指标最小为优化目标,并且将各组FMSS的容量作为优化变量。

$$\min C = C_{\text{inv}} + C_{\text{mt}} + C_{\text{loss}} + C_{\text{cut}} + C_{\text{new}} \quad (5)$$

其中, C 为互联配电网的年均总成本; C_{inv} 、 C_{mt} 分别为FMSS等年值购入成本和年设备维护成本; C_{loss} 为规划期内的年均配电网损经济成本; C_{cut} 和 C_{new} 分别为用户侧停电和新能源消纳不足(如弃风、弃光)造成的年均经济损失。

(1)FMSS等年值购入成本 C_{inv} 。

$$\begin{cases} C_{\text{inv}} = C_{\text{inv}}^* \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} \\ C_{\text{inv}}^* = \gamma_{\text{FMSS}} \sum_{i=1}^n S_{i, \text{FMSS}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, C_{inv}^* 为 FMSS 的初始购入成本, 其值与各组 FMSS 的容量 $S_{i, FMSS}$ (即本定容问题的待优化变量) 成正比; γ_{FMSS} 为比例系数, 即 FMSS 单位容量投资成本; r 为折现率; Y 为 FMSS 使用年限。

(2) FMSS 年设备维护成本 C_{mt} 。

$$C_{mt} = \lambda_{FMSS} \sum_{i=1}^n S_{i, FMSS} \quad (7)$$

其中, λ_{FMSS} 为 FMSS 单位容量年设备维护费用。

(3) 年均互联配电网网损经济成本 C_{loss} 。

$$C_{loss} = \frac{\mu_e}{T} \int_0^T \left(\sum_{j=1}^m I_j^2(t) R_j + \sum_{i=1}^n P_i^{loss}(t) \right) dt \quad (8)$$

其中, $I_j^2(t) R_j$ 为线路 j 在 t 时刻的有功损耗; m 为配电网线路总数; μ_e 为单位用电量经济成本; T 为规划期年限。

(4) 年均停电经济损失 C_{cut} 。

由于 FMSS 能够在线路发生故障后为失电负荷提供坚强的转移通道, 减小停电范围和停电损失。因此, 有必要将停电损失引入评价模型中, 通过更小的停电成本表征 FMSS 接入给配电网带来的经济效益。

停电损失经济评估具有一定的复杂性, 需计及不同的停电事故特性和用户类别。文献[12]提出了一种符合我国电力用户特点的停电损失调查方法和 3 种评价指标。其中, 可靠性预防费用(PAC)指标更适用于电网架构已成型时的停电损失经济评估, 本文将此作为停电经济损失的衡量手段。

假设配电网各个节点的 PAC 指标值已参照文献[12]提出的方法采集完毕, 在此基础上可进一步得到规划期内因用户停电导致的配电网年均经济损失为:

$$C_{cut} = \frac{1}{T} \int_0^T \sum_{k=1}^K \rho_k P_{k, cut}(t) dt \quad (9)$$

其中, ρ_k 为节点 k 的 PAC 指标值, 单位为元 / (MW·h); K 为节点总数; $P_{k, cut}(t)$ 为节点 k 处负荷在 t 时刻由于发生永久性故障切除线路而产生的脱网功率。

(5) 年均弃风 / 弃光经济损失 C_{new} 。

新能源发电具有显著的随机性和波动性, 系统的调节能力有限, 在风电、光伏等新能源大规模并网时, 通常无法对其发电功率实现完全消纳, 由此将产生弃风 / 弃光经济损失 C_{new} :

$$C_{new} = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\kappa_v \sum \Delta P_v(t) + \kappa_w \sum \Delta P_w(t) \right) dt \quad (10)$$

其中, κ_v 为光伏发电单价; $\sum \Delta P_v(t)$ 为系统在 t 时刻的总弃光发电功率; κ_w 为风电发电单价; $\sum \Delta P_w(t)$ 为系统在 t 时刻的总弃风发电功率。

2.2 基于并查集和粒子群优化算法的 FMSS 定容问题求解算法

FMSS 的优化配置方案与其时序运行特性相耦

合, 灵活多样的 FMSS 运行策略进一步加大了 FMSS 容量规划这一涉及潮流计算的复杂非线性最优化问题的求解难度。对此, 本节在传统粒子群优化算法^[13-14]的基础上, 引入了并查集算法动态判定 FMSS 的运行模式, 提出了一种启发式 FMSS 定容方法。优化所得方案能够满足互联配电网的经济性最优, 同时展现 FMSS 在电压调节、潮流均衡、故障恢复等方面的突出作用。

从式(5)所示的目标函数可看出, 为计算配电网的年均总成本, 需要采集各支路电流和流经 FMSS 的功率, 以求得配电网网损成本 C_{loss} ; 需要判断各节点负荷是否脱网, 以求得停电经济损失 C_{cut} ; 需要计算新能源的实时消纳功率, 以求得弃风 / 弃光经济损失 C_{new} 。因此, 需对含 FMSS 接入的互联配电网进行实时的潮流计算。但系统潮流会受到 FMSS 装设容量的约束, 也和 FMSS 的运行策略密切相关, 然而后者又会因 FMSS 某端口是否向无源线路供电而有所调整, 可能在配电网因故障线路切除导致拓扑重构的情况下发生切换。因此, 为解决 FMSS 容量优化这一非线性最优化问题, 不可简单地套用粒子群优化算法, 而应根据配电网的实时拓扑对各个粒子中不同的 FMSS 进行更为细致的分类和处理。

首先, 讨论表 2 中 FMSS 双端均与有源网络相连的运行场景。为简化分析, 将 4 种工作模式均近似处理为 PQ-PQ 模式。如当 FMSS 运行于 V_{dc} Q-PQ 模式时, V_{dc} 控制将维持直流电压在额定值附近, 此时所有端口流出的有功功率满足式(1)所示的有功约束。因此, 通过向 FMSS 添加有功平衡约束条件(式(1)), 可用 PQ-PQ 工作模式近似替代 V_{dc} Q-PQ 模式。而在其他 3 种工作模式中, 端口 2 均含有功率控制, 等效方式类似。

然后, 假设 FMSS 的无功功率控制和交流电压控制具有类似的应用效果, 可以将 FMSS 各端口控制目标的第二项全部替换为 Q 控制。这便将 FMSS 双端与有源线路相连时的多种工作模式简化为单一的 PQ-PQ 模式, 端口所连节点均可视为 PQ 节点。当 FMSS 一端与无源网络相连时, 情况略有不同。按上述思路, $V_{dc}V_{ac}-V/f$ 和 $V_{dc}Q-V/f$ 这 2 种工作模式均可等效为 PQ-V/f 模式。这类 FMSS 一端与有源系统相连, 对应节点为 PQ 节点; 另一端向无源网络供电, 相应节点为 $V\delta$ 平衡节点。

根据上述分析可知, FMSS 某端口的工作模式 (PQ 或 V/f 模式) 可以基于该端口所连系统的有源和无源性质予以辨识, 或等效地通过判断该端口节点是否与平衡节点间接相连加以确定。对此, 本文运用图论中一种简明、高效的“并查集”数据结构来应对上述典型的网络动态连通性问题^[15-16], 主要涉及 union 和 connected 这 2 种操作: union(i, j) 用于在

节点 i 和 j 之间添加连接; $connected(i, j)$ 用于判断节点 i 和 j 是否直接或间接相连。

下面为 FMSS 端口工作模式的判断方法。

(1) 基于互联配电网的实时拓扑和 FMSS 的位置信息形成邻接矩阵或连接对, 用 union 操作将经由配电馈线而非 FMSS 实现电气相连的节点对进行连接。

(2) 用 $connected$ 操作判断各 FMSS 端口节点与平衡节点的连接情况。若相连, 则表明该端口与有源线路相连, 运行于 PQ 工作模式; 反之, 则运行于 V/f 工作模式, 将端口对应节点置为 V δ 平衡节点。

需指出, 上述用于动态判定 FMSS 端口工作模式的并查集算法只需单次遍历配电网中的连接对, 具有一定的高效性。同时, 该方法着重于解决 FMSS 各端口节点与平衡节点的连通性问题, 并未涉及 FMSS 端口数目, 因而适用于多端口 FMSS 工作模式的快速判断, 并可推广至其他 FMSS 规划类问题中。

综上, 本文所提定容方法的完整流程如附录 A 中图 A1 所示。

3 算例分析

3.1 算例系统说明

为验证本文所提 FMSS 定容策略的正确性和有效性, 以图 2 所示的互联配电网为对象进行仿真测试。该系统由 IEEE 14 节点和 IEEE 33 节点 2 个配电子系统构成, 两者的基准电压分别为 23 kV 和 12.66 kV, 配电总负荷分别为 $28.7+j7.75 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 和 $5.08+j2.55 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。将节点编号为 1—47, FMSS 候选位置设为 45 条固有支路(实线)和 10 条联络开关备选支路(虚线)。

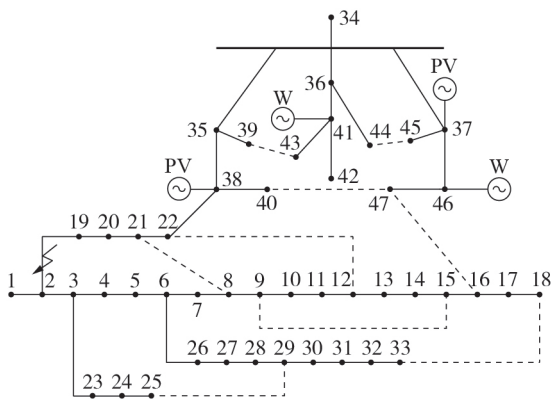


图2 含新能源的互联配电网拓扑

Fig.2 Topology of interconnected distribution network with renewable energy resources

风电/光伏系统的基本配置、FMSS和联络开关的成本参数、各节点负荷的单位电量停电损失^[17]分别见附录A中表A1—A3。广西某地四季典型日内负荷曲线和新能源出力曲线分别见附录A中图A2

和A3。

为充分验证本文所提方法的有效性, 设置对比方案如下: 方案1, 无任何联络开关或FMSS; 方案2, 设置3组联络开关; 方案3, 设置2组FMSS, 应用本文所提方法定容; 方案4, 设置3组FMSS, 其容量默认为最大预设值; 方案5, 设置3组FMSS, 应用本文所提方法定容; 方案6, 设置4组FMSS, 应用本文所提方法定容。

设定FMSS各端口变流器有功功率调节范围为 $[-3, 3] \text{ MW}$, 无功调节范围为 $[-2.25, 2.25] \text{ Mvar}$, 最大和最小安装容量分别为 $3, 0.5 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 优化步长为 $0.01 \text{ MV}\cdot\text{A}$ 。随机选取故障线路, 假定每天最多有1条线路发生故障, 全年故障概率为0.2%。

3.2 方案分析与比较

3.2.1 FMSS配置方案

根据文献[18]所提开关选址方法确定方案2的开关位置, 并结合基于并查集的FMSS运行模式确定方法, 实现方案3—6的FMSS选址。在此基础上, 应用本文所提FMSS定容方法, 最终得到不同方案下各开关的优化配置结果如表3所示。表中, 1.60(8—21)表示该FMSS容量为 $1.60 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 两端口分别与节点8和节点21相连, 其他类似。

表3 开关位置与FMSS容量配置

Table 3 Locations of switches and capacities of FMSSs

方案	联络开关位置	FMSS容量/(MV·A) (所在位置)				总/平均容量/ (MV·A)
1	—	—	—	—	—	0/0
2	12—22, 25—29, 40—47	—	—	—	—	0/0
3	—	1.60 (8—21)	1.52 (16—47)	—	—	3.12/1.56
4	—	3 (16—47)	3 (22—38)	3 (25—29)	—	9/3
5	—	1.43 (16—47)	1.12 (22—38)	1.28 (25—29)	—	3.83/1.28
6	—	0.50 (8—21)	1.40 (16—47)	1.26 (22—38)	1.12 (25—29)	4.28/1.07

根据方案3、5、6的容量数据可以发现, FMSS的安装数目越少, 单组FMSS承担的保障互联配电网经济性和可靠性的责任就越大, FMSS平均容量随之增大, 反之则减小。

3.2.2 经济指标与方案比较

表4给出了6种方案的年均总成本及单项成本。由表4可知, 由于FMSS是基于新型电力电子技术, 其结构复杂, 价格昂贵, 在购入成本和维护成本方面均显著高于传统联络开关, 对于未进行FMSS容量优化的方案4, 其FMSS购入成本已接近总成本的28%; 在网络损耗方面, 方案2通过配电网重构手段

优化了潮流,方案3—6则利用FMSS的调压功能缓解了部分线路末端电压偏低的问题,均使得运行网损较方案1有所减少;在停电损失和弃风/弃光损失方面,方案2—6表现良好,尤其是方案5和方案6,运行经济效益明显高于互联配电网在FMSS购入成本和维护成本上的亏损,年均总成本相比于无开关配置的方案1分别降低了24.9%和24.1%。

表4 6种方案详细的年均成本

Table 4 Detailed annual average costs of six schemes

方案	成本/万元					
	C	C_{inv}	C_{mt}	C_{loss}	C_{cut}	C_{new}
1	719.5	0	0	304.5	76.3	338.7
2	589.8	0.1	0.1	284.4	3.0	302.3
3	601.5	63.5	12.4	260.2	0.1	265.0
4	658.6	183.3	36.0	229.8	0.1	209.3
5	540.7	78.0	15.3	234.1	0.1	213.1
6	545.8	87.1	17.1	229.8	0.1	211.6

以方案1为基准,计算各方案的相对投资回收期,其计算表达式如式(11)所示。

$$T_{pb}(s) = \frac{K(s)}{\Delta A(s)} \quad s=2, 3, \dots, 6 \quad (11)$$

其中, $T_{pb}(s)$ 为方案 s 相对于方案1的投资回收期; $K(s)$ 为方案 s 的投资成本,包括FMSS(联络开关)的初始购入成本和投资初始年的设备维护成本,如式(12)所示; $\Delta A(s)$ 为相对年利润,如式(13)所示。

$$K(s) = C_{inv}^*(s) + C_{mt}(s) \quad (12)$$

$$\Delta A(s) = A(1) - A(s) \quad (13)$$

其中, $A(s)$ 为方案 s 的年运行成本,表示网损、停电、弃风/弃光的年经济损失之和,如式(14)所示。

$$A(s) = C_{loss}(s) + C_{cut}(s) + C_{new}(s) \quad (14)$$

表5给出了6种方案的投资成本 $K(s)$ 、年运行成本 $A(s)$ 、相对年利润 $\Delta A(s)$ 以及相对投资回收期 $T_{pb}(s)$ 。

表5 6种方案的成本和投资回收期

Table 5 Costs and payback periods of six schemes

方案	$K(s)$ /万元	$A(s)$ /万元	$\Delta A(s)$ /万元	$T_{pb}(s)$ /a
1	0	719.58	0	—
2	0.42	589.81	129.77	0.01
3	624	525.47	194.11	3.28
4	1800	439.32	280.26	6.55
5	766	447.38	270.20	2.83
6	856	441.57	278.01	3.14

由表5可知,对于采用联络开关的方案2而言,尽管其回收成本的周期很短,但较小的相对年利润(仅为方案5的48.03%)不利于配电网系统的长远发展。同理,相对年利润和投资回收期相较于方案5均稍显逊色的方案3也建议不予采用。对于方案4而言,其采用了3组最大容量(3 MV·A)的FMSS,投

资成本过高,而冗余的FMSS容量也未能带来与之成正比的经济效益,其相对年利润和方案5、6基本持平,因而需要更长的投资回收期,显然方案4并非理想的配置方案。对比方案5和方案6,前者成本回收周期短,后者相对年利润高,难以从经济层面做出孰优孰劣的最终评判。但考虑到FMSS的运行复杂程度远高于传统联络开关,需要依赖于先进、完善的通信及控制系统,也面临着保护整定配合难度大等问题。从配电网全局角度出发,在提升配电网经济性能相当的前提下,理应选择FMSS安装数量更少的方案5而非方案6。

综上,根据基于互联配电网各项经济指标的分析,采用本文所提方法优化所得的方案5年利润较高,投资回收期较短,是FMSS定容的最佳方案。

3.2.3 典型场景的配电网运行比较

通过分析3.2.2节的经济性指标可得FMSS的优化配置结果。为展现不同时刻配电网运行情况以及FMSS对配电网运行的优化效果,选取正常运行、高负荷、线路2-19故障、新能源过剩这4种典型场景进行具体分析。4种场景下风电/光伏发电量分别占各自额定功率的50%、20%、50%和90%,各节点负荷分别为额定值的75%、95%、75%和40%。4种运行场景下6种方案每小时的经济损失如图3所示。

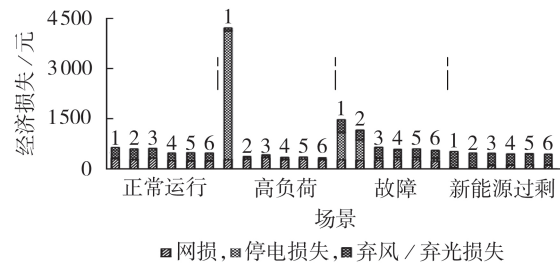


图3 4种运行场景下6种方案每小时的经济损失

Fig.3 Hourly economic losses of six schemes under four operating scenarios

观察图3可得到以下结论。

(1)对于含FMSS接入的方案3—6,FMSS通过联结不同馈线和不同配电区域,促进了新能源在另一个配电网中的消纳,各种运行场景下弃风/弃光损失较方案1、2有所减小。而系统网损在部分场景下将有所增加,但总损失呈下降趋势。

(2)由于FMSS具有无功支撑和电压调节能力,也能在故障期间进行快速负荷转供,降低了负荷切除的可能性,减小了停电经济损失。高负荷场景和线路故障场景下的算例结果表明FMSS在恶劣运行场景下能有效保障互联配电网的安全性与经济性。

(3)当增加FMSS配置数目(方案4—6),网架结构得到进一步优化,但因FMSS容量充足,对配电网经济性的提升能力趋近于饱和,三者的网损、弃风/

弃光经济损失在不同场景下相差不大。

3.3 求解时间对比

鉴于当前的FMSS定容研究鲜有涉及对FMSS控制切换的讨论,为验证本文所提方法在求解FMSS定容问题上的快速性和收敛性,根据文献[18]提出的针对开关选址的遗传编码策略,进一步设置FMSS工作模式染色体参与遗传编码(方法1),并与本文所提的方法(方法2)进行对比。应用2种方法求解上述容量规划模型,两者在50次迭代过程中的收敛情况如图4所示。

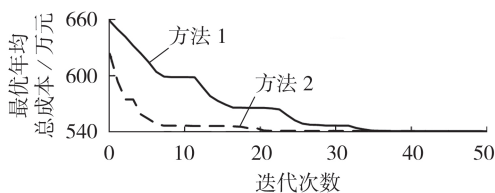


图4 2种方法的收敛情况

Fig.4 Convergence conditions of two methods

从图4可以看出,应用2种方法最终得到的优化结果高度一致,偏差不足1%,由此说明基于等效原则将FMSS端口在不同工况下的工作模式悉数转换为PQ和V/f模式的处理办法是可行的。从收敛速度来看,方法1需经过35次迭代达到收敛,单次迭代耗时1735.2s;而方法2仅需要迭代21次,单次迭代时间缩短至276.0s,总收敛时长减少了90.5%。究其原因:一方面,方法1将FMSS的工作模式一一通过染色体编码的方式予以表示,可能出现种群中部分个体工作模式互为等效的情况,解集存在重复性,进而影响了种群的搜索效率;另一方面,由于遗传算法在编码赋值过程中具有一定的随机性,染色体变异产生的新子代个体也可能不符合实际,修正不可行解的这一额外步骤同样会产生大量的时间损耗。然而,方法2引入了高效的并查集算法,将FMSS端口工作模式的确定问题转换为各端口节点是否与平衡节点直接或间接相连的连通性问题,避免了对FMSS工作模式的硬编码操作,也无需加设额外的不可行解修正环节,整套流程简单、快捷,收敛结果与文献[18]力求精确的求解算法下的结果高度吻合。以上对比分析充分说明了本文所提方法的优越性和有效性,在计及FMSS工作模式多样性的前提下能快速收敛到最优点,有良好的计算效率和优化结果。

4 结论

本文以FMSS定容问题为研究对象,兼顾配电网运行的经济性和可靠性,建立了计及多类成本(经济损失)的综合成本评价模型。考虑到FMSS运行模式的多样性和时序性,提出了一种基于并查集的FMSS工作模式动态判定算法,提高了潮流的计算效

率,并结合粒子群优化算法对上述规划问题进行求解。在算例部分对比分析了IEEE 14与IEEE 33节点互联配电网在不同定容方案下的多项经济和成本指标,并在求解效率上与遗传算法进行比较。结果表明,本文所提方法收敛速度快,对应的优化方案经济性好,通过对FMSS的合理规划,能够充分发挥其在电压支撑、故障恢复、新能源消纳等方面的显著优势,适应配电网未来的发展需求。

后续还将进一步深化负荷和DG出力的不确定性建模,开展对源荷发展增长、联络开关与FMSS混合配置、配电网市场化运作机制等因素的研究,以实现在复杂场景下对FMSS的选址定容协同优化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-8.
SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [2] 曾博,杨煦,张建华. 考虑可再生能源跨区域消纳的主动配电网多目标优化调度[J]. 电工技术学报,2016,31(22):148-158.
ZENG Bo, YANG Xu, ZHANG Jianhua. Multi-objective optimization for active distribution network scheduling considering renewable energy harvesting across regions [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(22): 148-158.
- [3] 周密,徐箭,孙文章. 多端柔性直流电网平抑风电波动的协调控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(12):29-35.
ZHOU Mi, XU Jian, SUN Yuanzhang. Coordinated control restraining wind power fluctuation of VSC-MTDC [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(12): 29-35.
- [4] BLOEMINK J, GREEN T. Increasing distributed generation penetration using soft normally-open points [C] // IEEE Power and Energy Society General Meeting. Providence, USA: IEEE, 2010: 1-8.
- [5] LI Peng, JI Haoran, WANG Chengshan, et al. Coordinated control method of voltage and reactive power for active distribution networks based on soft open point [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(4): 1430-1442.
- [6] CAO Wanyu, WU Jianzhong, JENKINS N, et al. Operating principle of soft open points for electrical distribution network operation [J]. Applied Energy, 2016, 164: 245-257.
- [7] 娄铖伟,张筱慧,丛鹏伟,等. 含柔性软开关的有源配电网故障恢复策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(1):23-31.
LOU Chengwei, ZHANG Xiaohui, CONG Pengwei, et al. Service restoration strategy of active distribution network with soft open points [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 23-31.
- [8] 丛鹏伟,唐巍,娄铖伟,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.
- [9] 惠飞翔. 中压柔性直流环网控制装置选址定容技术研究[D].

- 北京:华北电力大学,2016.
- HUI Feixiang. Research of medium voltage flexible DC loop control devices locating and siting[D]. Beijing:North China Electric Power University,2016.
- [10] 马丽,薛飞,石季英,等. 有源配电网分布式电源与智能软开关三层协调规划模型[J]. 电力系统自动化,2018,42(11):86-93.
- MA Li,XUE Fei,SHI Jiying,et al. Tri-level coordinated planning model of distribution generator and intelligent soft pen point for active distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(11):86-93.
- [11] 王成山,宋关羽,李鹏,等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关SOP规划方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1889-1897.
- WANG Chengshan,SONG Guanyu,LI Peng,et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(7):1889-1897.
- [12] 王超,徐政,潘武略,等. 中国用户停电损失调查方法[J]. 电网技术,2007,31(11):54-58.
- WANG Chao,XU Zheng,PAN Wulue,et al. Customer interruption costs investigation method for China[J]. Power System Technology,2007,31(11):54-58.
- [13] 李晓利,高金峰. 用于配电网多目标无功优化的改进粒子群优化算法[J]. 电力自动化设备,2019,39(1):106-111.
- LI Xiaoli,GAO Jinfeng. Improved particle swarm optimization algorithm for multi-objective reactive power optimization of distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):106-111.
- [14] 艾欣,李一铮,王坤宇,等. 基于混沌模拟退火粒子群优化算法的电动汽车充电站选址与定容[J]. 电力自动化设备,2018,38(9):9-14.
- AI Xin,LI Yizheng,WANG Kunyu,et al. Locating and sizing of electric vehicle charging station based on chaotic simulated annealing particle swarm optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(9):9-14.
- [15] SEDGEWICK R. Algorithms in java,part 5:graph algorithms[M]. Boston,USA:Addison-Wesley Professional,2003:28-98.
- [16] CHARGUÉRAUD A,POTTIER F. Verifying the correctness and amortized complexity of a union-find implementation in separation logic with time credits[J]. Journal of Automated Reasoning,2017(1):1-35.
- [17] 陈清森. 电力用户停电损失评估及配电网可靠性成本效益评估[D]. 沈阳:东北大学,2015.
- CHEN Qingmiao. The assessment of the outage cost of customers and the cost-effective of the reliability of distribution network[D]. Shenyang:Northeastern University,2015.
- [18] 刘自发. 基于智能优化算法的配电网规划与优化运行研究[D]. 天津:天津大学,2005.
- LIU Zifa. A study on distribution network planning and optimal operation based on intelligence optimization algorithms[D]. Tianjin:Tianjin University,2005.

作者简介:



林湘宁

林湘宁(1970—),男,广西贵港人,教授,博士研究生导师,研究方向为新能源微电网规划运行和电力系统继电保护与控制(E-mail:xiangning.lin@hust.edu.cn);

李卓(1994—),男,湖北武汉人,硕士研究生,研究方向为新能源发电与微电网、储能控制(E-mail:1329878250@qq.com);

叶雨晴(1996—),女,浙江金华人,硕士研究生,通信作者,研究方向为交直流系统分析与保护(E-mail:389050816@qq.com)。

(编辑 李玮)

Sizing method of flexible multi-state switches based on union-find set

LIN Xiangning¹,LI Zhuo¹,YE Yuqing¹,MA Xiao¹,WANG Zixuan¹,XU Feng²,WANG Chaoliang²

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology,Wuhan 430074,China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Zhejiang Electric Power Co.,Ltd.,Hangzhou 310014,China)

Abstract: As an important power electronic device for distribution network transformation, FMSS (Flexible Multi-State Switch) has not been widely applied due to its high cost and immature technology. In order to plan the FMSS capacity rationally, and take the economy and power supply reliability of distribution network into account at the same time, a comprehensive cost evaluation model of the distribution network containing renewable resources is established, which takes the minimum annual total cost as the optimization objective. And the particle swarm optimization algorithm is applied to solve the sizing problem. Considering the dynamic switching of operating modes for FMSS, the operating modes of FMSS under complex conditions are simplified, and the union-find set algorithm is introduced to rapidly and effectively identify the real-time operating modes of FMSS. It highly improves the solving speed of the sizing problem, and overcomes the defects of the existing optimization schemes that fails to fully consider the diversity and dynamics of the operation strategy for FMSS. Several comparative simulative results in IEEE 14-bus and 33-bus interconnected distribution systems indicate that the proposed method has a certain superiority in computing speed, and the obtained optimal scheme can promote the consumption of renewable energy, improve the power supply reliability of distribution networks, and has favorable economic benefits.

Key words: distribution network; FMSS; capacity planning; union-find set; economy; reliability

附录

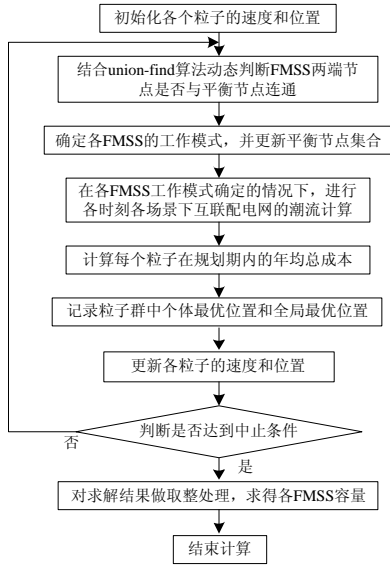


图 A1 结合粒子群和并查集的定容算法流程图

Fig.A1 Flowchart of sizing algorithm combining PSO and union-find

表 A1 新能源机组配置

Table A1 Configuration of renewable energy resources

接入节点	类型	有功容量/MW	接入节点	类型	有功容量/MW
37	光伏	1	41	风电	2
38	光伏	1	46	风电	2

表 A2 成本相关参数

Table A2 Cost-related parameters

参数	数值
FMSS 全寿命使用年限/a	20
FMSS 单位容量投资成本/[元 · (kV · A) ⁻¹]	2000
折现率/%	8
FMSS 功率损耗系数/%	2
FMSS 单位容量运行维护费用/[元 · (kV · A) ⁻¹]	10
FMSS 单位优化容量/(kV · A)	100
电价/[元 · (kW · h) ⁻¹]	0.5
联络开关投资成本/元	1400
联络开关维护成本/元	14

表 A3 各节点单位电量停电损失

Table A3 Outage loss per kW · h of each node

节点	PAC /[元 · (kV · A) ⁻¹]	节点	PAC /[元 · (kV · A) ⁻¹]	节点	PAC /[元 · (kV · A) ⁻¹]
1	—	17	2.4	33	2.4
2	45.4	18	2.4	34	—
3	45.4	19	2.4	35	45.4
4	45.4	20	2.4	36	45.4
5	45.4	21	2.4	37	45.4
6	7.5	22	2.4	38	2.4
7	7.5	23	2.4	39	2.4
8	7.5	24	2.4	40	42.65
9	7.5	25	2.4	41	42.65
10	7.5	26	2.4	42	42.65
11	7.5	27	2.4	43	42.65
12	7.5	28	2.4	44	42.65
13	7.5	29	2.4	45	45.4
14	7.5	30	2.4	46	45.4
15	7.5	31	2.4	47	2.4
16	7.5	32	2.4		

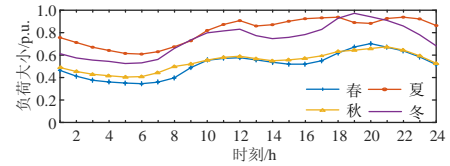


图 A2 各季节典型日负荷曲线

Fig.A2 Typical daily load curves in each season

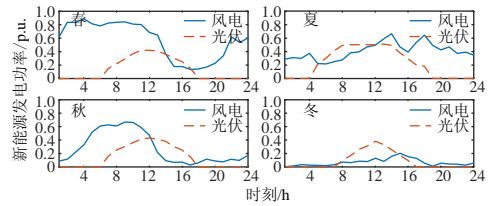


图 A3 新能源机组典型日出力曲线

Fig.A3 Typical daily power curves of renewable energy units