

轨迹驱动切负荷的布点协调优化算法的简化

薛禹胜^{1,2}, 戴元煜^{2,1}, 任先成¹, 余文杰^{1,3}, 倪明¹, 岳东⁴

(1. 南瑞集团公司(国网电力科学研究院), 江苏省南京市 211106; 2. 南京理工大学自动化学院, 江苏省南京市 210094;

3. 东南大学电气工程学院, 江苏省南京市 210096; 4. 南京邮电大学先进技术研究院, 江苏省南京市 210003)

摘要: 随着系统规模及各种不确定性的增加, 轨迹驱动切负荷(TDLS)的布点优化的计算量急剧增加。综合考虑负荷模型对布点优化的计算量及精度的影响, 验证在 TDLS 布点中采用简化负荷模型的可行性。同时, 改进已有的协调优化算法。包括简化其流程, 减少迭代次数, 减少灵敏度系数的更新次数。仿真表明, 上述简化方法对计算精度的影响并不显著, 但计算量大幅降低, 有利于工程实用。

关键词: 切负荷; 暂态电压稳定; 暂态频率稳定; 负荷模型; 不确定性因素; 布点的贡献度; 控制风险; 灵敏度分析

0 引言

轨迹驱动切负荷(TDLS)是在检测到低频或低压现象后启动的分散式反馈控制措施, 包括低频切负荷(UFLS)和低压切负荷(UVLS), 属于停电防御框架中第三道防线(校正控制)的范畴。它可以降低第一道防线(预防控制)与第二道防线(紧急控制)的拒动风险, 也是应对小概率严重事件的关键措施^[1-3]。

国内外对 UFLS/UVLS 都有大量研究^[4-7], 但鲜有讨论切负荷(LS)布点优化的论文。文献[4]基于贡献度和风险概念, 提出了 UFLS/UVLS 布点及轮次的协调优化算法, 该算法将 UFLS/UVLS 协调优化问题解耦为布点优化、首轮 LS 初值优化、后续轮 LS 优化和 UFLS/UVLS 协调, 并提出按控制母线对所有不安全故障的综合贡献度动态排序优化布点。但其实用性受到计算量的限制。特别是由于不确定性因素的种类及其联合分布复杂性的增加, 仿真的场景数急剧增加^[8]。为此, 迫切需要合理地简化算法, 在尽可能少地牺牲计算精度的条件下, 最大限度地减少计算量。减少反映不确定性的场景数, 可降低计算量, 但会降低布点结果的强壮性; 简化算法的迭代过程, 也可减少计算量, 但会影响优化

效果。

本文对文献[4]方法的改进包括: 提出评估简化效果的方式, 研究负荷模型对 TDLS 布点的影响及采用简化负荷模型的可行性, 从贡献度的计算和协调优化的流程这两方面简化 TDLS 布点算法, 通过仿真算例验证其可行性, 并分析了不确定性因素种类及其复杂性对计算量与计算精度的影响。

1 TDLS 布点优化算法的简化思路和评估

文献[4]提出的 TDLS 布点协调优化算法需要多次迭代, 而在每次迭代中需通过摄动法更新各候选母线的灵敏度。这对于有成百上千个候选母线的实际系统来说计算量太大。本文基于工程实际应用对计算精度和计算速度的要求, 讨论 TDLS 布点中采用简化负荷模型的可行性, 并从简化母线控制灵敏度的求取和简化协调优化的流程出发, 简化 TDLS 布点的优化算法。

若仅考虑静态负荷模型, 则计算量可减少, 但必须掌握忽略动态负荷模型所增加的控制风险。本文用调用稳定性量化软件 FASTEST^[9]的次数来反映计算量, 而按使系统安全的最小控制代价与故障场景概率的乘积来反映控制风险^[10]。同时, 采用文献[4]的详细算法及负荷模型的控制风险及布点计算量为基准来标幺化各简化算法的风险和计算量。简化算法以控制风险的增加来换取计算量的降低, 而两者之间的权值反映了不同的偏好程度, 在工程应用中可按实际计算能力的限制来选择精度最优者。

收稿日期: 2015-02-14; 修回日期: 2015-07-16。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2013CB228204); 澳大利亚 ARC 资助项目(DP120101345); 中英合作研究项目(513111025-2013, EP/L001063/1); 国家电网公司科技项目。

2 贡献度的概念

2.1 贡献度的定义^[4]

对造成频率或电压不安全的单个故障 d , 定义 TDLS 母线 k 对改进各违约母线 i 安全性的贡献度之和为:

$$D_{k,d} = \sum_i D_{k,i} = \sum_i \frac{\Delta\eta_i}{\Delta P_{c,k}} \frac{P_{c,k}}{|\eta_i|} \frac{C_{u,i}}{C_{c,k}} \quad (1)$$

式中: $D_{k,i}$ 为 TDLS 母线 k 对违约母线 i 安全性的贡献度; $\Delta\eta_i/\Delta P_{c,k}$ 为 TDLS 母线 k 对违约母线 i 的控制灵敏度; $P_{c,k}$ 为可中断负荷量; $C_{c,k}$ 为可中断负荷停电代价; $C_{u,i}$ 为不可中断负荷违约损失。

这里的控制灵敏度仅反映物理规律, 而贡献度则同时考虑了物理规律及停电代价, 反映了母线 k 通过 TDLS 的主动停电而可以减少的违约损失。

在不确定性因素 u 的联合概率 λ_u 及故障概率 λ_d 下, TDLS 母线 k 对整个故障集的综合贡献度为:

$$D_k = \sum_u \lambda_u \sum_d \lambda_d \sum_i \frac{\Delta\eta_i}{\Delta P_{c,k}} \frac{P_{c,k}}{|\eta_i|} \frac{C_{u,i}}{C_{c,k}} \quad (2)$$

2.2 $\Delta\eta_i$ 的限定

为防止 TDLS 母线 k 对某一违约母线 i 灵敏度太大或出现负效应^[11] 而导致综合贡献度 D_k 的排序中发生“淹没”现象, 对 $\Delta\eta_i$ 有如下限定:

$$\Delta\eta_i = \begin{cases} -\eta_{i0} & \eta_{i0}\eta_{ip} < 0 \\ \eta_{ip} - \eta_{i0} & \eta_{i0}\eta_{ip} \geq 0 \cap \eta_{ip} \geq 2\eta_{i0} \\ \eta_{i0} & \eta_{ip} < 2\eta_{i0} \end{cases} \quad (3)$$

式中: η_{i0} 和 η_{ip} 为摄动前后的裕度。

为了克服“淹没”现象, 将 TDLS 母线 k 对违约母线 i 的贡献度限制在区间 $[-P_{c,k}C_{u,i}/(\Delta P_{c,k}C_{c,k}), (P_{c,k}C_{u,i}/\Delta P_{c,k}C_{c,k})]$ 内。

3 负荷模型对 TDLS 布点的影响

3.1 动态负荷对暂态电压和暂态频率安全性的影响

动态负荷包括时间常数较小的感应电动机及时间常数较大的有载调压变压器与恒温负荷^[12-13]。其中, 感应电动机是引起暂态电压失稳的重要因素^[14-15]。一般来说, 动态负荷比例越大, 暂态电压稳定性和暂态电压跌落可接受性就越差。一方面由于恒阻抗和恒电流负荷吸收的有功功率下降, 一定程度上抑制了频率跌落; 另一方面, 动态负荷恢复的有功功率趋于增加而可能导致更严重的频率跌落。因此, 动态负荷的占比对故障后暂态频率安全性的影响可能为非单调关系^[16-17]。

3.2 计及动态负荷的电压贡献度

暂态电压安全性包括暂态电压跌落可接受性和

暂态电压稳定性两方面, 分别反映静态负荷及动态负荷的电压安全性。因此, 在计算 TDLS 母线 k 对违约母线 i 电压的贡献度时取:

$$D_{k,i} = \alpha_i \frac{\Delta\eta_{i,vd} P_{c,k} C_{u,i}}{\Delta P_{c,k} |\eta_{i,vd}| C_{c,k}} + (1 - \alpha_i) \frac{\Delta\eta_{i,vs} P_{c,k} C_{u,i}}{\Delta P_{c,k} |\eta_{i,vs}| C_{c,k}} \quad (4)$$

式中: 权值 α_i 取为静态负荷在违约母线 i 中的占比; $\eta_{i,vd}$ 和 $\eta_{i,vs}$ 分别为违约母线的暂态电压跌落裕度和暂态电压稳定裕度^[18]。

3.3 动态负荷对 TDLS 布点的影响

3.3.1 优化效果及计算量的权衡

动态负荷模型通过影响越限母线的违约程度及 TDLS 母线的控制效果, 来改变各候选(控制)母线的综合贡献度排序。故在 TDLS 布点中选用负荷模型时, 需要权衡具体项目对模型及计算量的要求。

对计算量可直接评估, 而对优化效果则可以将 TDLS 布点结果放在不同场景(包括实际模型、工况、故障等因素)下仿真评估。控制总风险越小, 则效果越强壮。

3.3.2 布点结果的强壮性评估

某特定的布点方案在校核工况 m (或所有校核工况) 下的控制风险 R_m (或控制总风险 R) 为:

$$R_m = \sum_u \lambda_u \sum_d \lambda_d C_{m,u,d} \quad (5)$$

$$R = \sum_m \lambda_m \sum_u \lambda_u \sum_d \lambda_d C_{m,u,d} \quad (6)$$

式中: $C_{m,u,d}$ 为校核工况 m 中, 故障 d 在不确定性因素组合 u 下所需的控制代价, 包括可中断负荷停电代价和不可中断负荷违约损失两方面。

3.3.3 动态负荷模型的选用流程

步骤 1: 在各种负荷模型下, 得到相应的 UVLS 和 UFLS 布点结果。

步骤 2: 选择若干个动态负荷的比例, 以反映实际负荷特性的不确定性。将其逐个作为校核工况, 对每个故障求取控制代价 $C_{m,u,d}$, 并按式(5)和式(6)计算控制风险。

步骤 3: 以风险最小的方案做基准, 标么化其他方案的风险值(或计算量)。

步骤 4: 将只采用静态负荷模型的优化结果的控制风险与基准值比较, 并按工程概念能否接受该差异来判定是否需要计及动态负荷模型。下文将通过仿真算例进一步加以讨论。

4 TDLS 灵敏度更新方式的简化

TDLS 布点优化算法的简化包括 UFLS (或 UVLS) 单独布点优化的简化, 以及两者协调优化的简化。有关这两方面的内容分别在本节及下节

讨论。

4.1 UFLS 与 UVLS 对灵敏度更新的要求不同

TDLS 母线对单一违约母线的贡献度与控制灵敏度成正比,而其综合贡献度则与所有违约母线的控制灵敏度呈线性关系。控制灵敏度与电网结构及工况、TDLS 母线及违约母线的位置、切负荷的时机及控制量等因素密切相关。

暂态电压跌落的时空分布受功角振荡及系统无功等因素的影响^[19]。一般来说,与振荡中心的电气距离较近及本地无功支撑不够的那些母线的暂态电压跌落较严重,这导致 UVLS 动作的时空分布较明显^[20],而同一 UVLS 母线对不同的违约母线电压跌落的控制效果差别也很大。一条母线在其被确认为 UVLS 母线的前、后,对其他候选母线的控制灵敏度变化的影响很大,导致各候选母线在两次相邻的迭代中的贡献度排序变化较大。因此,UVLS 的布点优化必须在每次迭代中更新各候选母线的灵敏度。

暂态频率跌落的时空分布特性则与系统频率的跌落趋势较为一致^[21],各违约母线的违约程度相差不大。大量仿真表明,各 UFLS 首轮动作时机接近,且对频率跌落的各违约母线的控制灵敏度相差不大。在迭代过程中,候选母线的控制灵敏度在两次迭代中虽有所变化,但其排序的变化不大。故在 UFLS 布点优化中可采用固定的灵敏度来更新各候选母线的贡献度,以减少计算量。

4.2 降低母线灵敏度更新的频度

UFLS 的布点优化过程中,虽然各母线的控制灵敏度也随迭代而变,但其排序变化不大。为了研究 UFLS 母线灵敏度更新频度对优化效果的影响,比较以下 4 种方式下的计算量与控制风险。方式一(或方式二,或方式三):仅在首次(或前两次,或前三次)迭代中更新各 UFLS 母线的控制灵敏度。方式四:完整的迭代更新灵敏度^[4],即每次迭代都更新各 UFLS 母线的控制灵敏度。

LS 从电网中直接切除部分负荷而有助于电压及频率的恢复,但还存在着不利于电压及频率恢复的因素,即由于留网负荷的负荷特性,其吸收的功率可能随着电压及频率的恢复而趋于增加,从而抵消 LS 的正面影响。若反面影响大于正面影响,则产生 LS 负效应现象^[11]。

首次更新灵敏度时,由于 LS 的量很小,容易遇到负效应现象。后续迭代中,由于 LS 已经有相当量,不易观察到负效应现象。因此,方式一虽然减少的计算量最多,但其灵敏度值可能受负效应的影响而影响优化过程。方式二基本可以避免负效应的影响,且其计算结果已非常接近方式三,故推荐采用方式二。

5 协调优化流程的简化

5.1 数学模型

TDLS 协调优化的目标为总风险 R 最小, R 由两部分组成,分别对应于 UFLS 及 UVLS。若故障集中的全部故障只存在低频不安全,或只存在低压不安全,则不需要协调环节。否则,应考虑 UFLS/UVLS 的互相影响而协调优化 UFLS 和 UVLS 的布点。

$$\left\{ \begin{array}{l} \min R = \sum_u \lambda_u \sum_d \lambda_d \sum_l C_{d,l}^{\text{UFLS}}(P_{d,l}, \gamma_l) + \\ \quad \sum_u \lambda_u \sum_d \lambda_d \sum_l C_{d,l}^{\text{UVLS}}(P_{d,l}, \gamma_l) \\ \text{s.t.} \quad g(x) = 0 \\ \quad h(x) \geq 0 \\ \quad P_l \leq P_{l,\max} \\ \quad \eta_d \geq \epsilon \end{array} \right. \quad (7)$$

式中: $C_{d,l}^{\text{UFLS}}$ (或 $C_{d,l}^{\text{UVLS}}$)为故障 d 下第 l 个 TDLS 母线的 UFLS(或 UVLS)代价,它是 LS 数量 $P_{d,l}$ 和停电赔偿价 γ_l 的函数; u 为不确定因素; $g(x)=0$ 为系统运行的等式约束; $h(x) \geq 0$ 为不等式约束,可包含其他约束条件,如某些电网结构固有限制条件等; $P_{l,\max}$ 为 TDLS 母线 l 的最大可中断容量; η_d 代表各种安全稳定裕度。

5.2 协调优化的流程

协调优化布点采用“解耦优化-迭代协调”框架,见图 1(a)。UVLS 的动作时间一般早于 UFLS,而其控制空间则有很强的局部性。故首先优化 UVLS 布点子问题,再优化 UFLS 布点子问题,并反复迭代直至总风险收敛。其中,将上一个子问题的优化结果,纳入下一个优化子问题的仿真场景中。

图 1(b)以 UFLS 布点优化子问题为例,描述了其内部流程。根据贡献度信息和总风险,优化子问题的布点。具体过程为:从上一个子问题贡献度最差的母线开始,逐个去除上一个子问题的布点,求取所有候选母线集合 M 的频率贡献度并排序,依次增加布点,直至系统在所有故障下均保持频率安全及电压安全,并反复迭代直到总风险 R 收敛。

5.3 协调优化布点迭代过程的简化

5.3.1 两个优化子问题交互过程的简化

为了研究迭代过程对计算量与控制风险的影响,比较以下 3 种方案:方案一,仅先后优化 UVLS 和 UFLS 各一次,即无迭代的方案;方案二,在方案一的基础上,不再进行子问题内部的反复优化,而是根据对电压/频率的贡献度对 TDLS 布点试探替代;方案三,即文献[4]中的完整迭代方案。

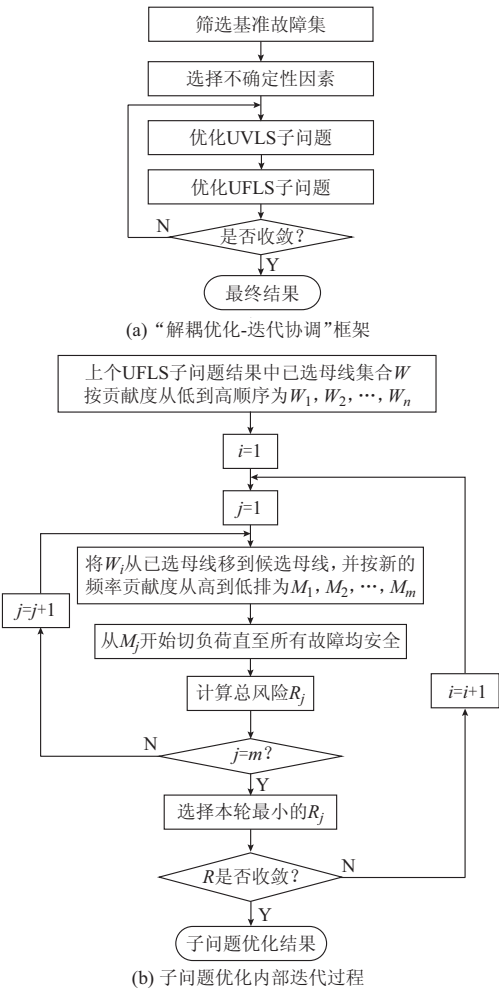


图1 协调优化布点的流程图
Fig.1 Flow chart of coordination for optimized TDLS placement

5.3.2 寻优中的替代处理

在先后优化 UVLS 和 UFLS 各一次后,得到 UVLS 和 UFLS 的初始解。此后,方案二不再像文献[4]那样完整地迭代,而是进入替代寻优。不失一般性,以刚结束的 UVLS 子问题的结果为场景,优化 UFLS 子问题为例,说明替代处理的寻优过程。

步骤 1:对上一轮 UFLS 选出的频率控制母线集合 W ,按对电压控制的贡献度从低到高排序,将候选的 UFLS 母线 M 中电压贡献度最高者 M_1 作为试探的替代者。

步骤 2:取 M_1 替代电压贡献度最低的 UFLS 已选母线。若总风险(同时计及电压安全及频率安全)没有降低,则再试探替代下一个已选母线,若都不成功,则替代过程结束;若总风险降低则确认该项替代,并在更新已选母线的队列及候选母线中新的电压贡献度最高者为 M_1 后,重复步骤 2,直至这样的替代不再能降低总风险为止。

由于候选母线队列中只有电压贡献度最高者会用作试探,并且在第一次替代成功以后就进入了已选母线的集合,故不必再试探替代其他的已选母线,与文献[4]相比可大大减少每轮试探次数和循环次数。

5.3.3 替代的流程

图 2 以 UFLS 布点子问题优化为例,描述了其内部流程:以上一个子问题的 UVLS 布点结果作为场景,根据 UFLS 母线对电压的贡献度信息,按 5.3.2 节方法对上一个子问题的 UFLS 布点结果进行替代优化,直至总风险 R 不能降低为止。

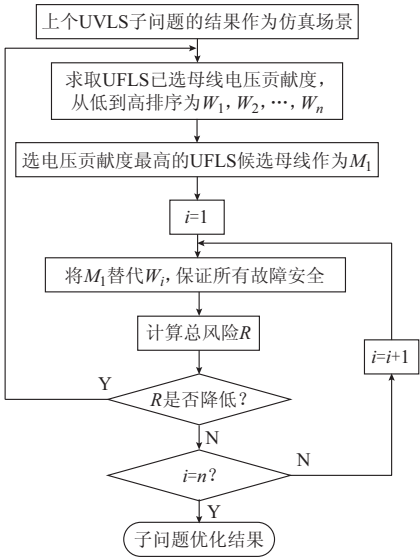


图2 简化的协调方案的子问题替代优化流程
Fig.2 Simplified scheme for optimization and coordination of TDLS placement

5.4 关于替代优化的讨论

对于电压及频率均存在不安全的故障集, TDLS 布点需要计及 UFLS 及 UVLS 的交互影响。协调优化布点完整迭代方案^[4]通过子问题之间和子问题内部的反复迭代来处理;本文的简化的协调方案则对 TDLS 布点进行替代优化,以其总风险来反映母线对电压及频率跌落的综合改善效果。大量仿真表明,本简化的协调方案的原则是保证与完整迭代方案相比,其风险误差在精度要求范围内以大幅降低计算量。

6 仿真算例

6.1 计及动态负荷的 TDLS 布点优化

6.1.1 计算场景

1) 仿真系统

取山东省网为例,用稳定性量化分析软件 FASTEST 进行时域仿真,并按照暂态电压和频率安全二元约束表计算电压及频率安全裕度,监视所

有 500 kV 和 220 kV 母线,暂态电压及频率安全二元约束表分别为(0.75(标么值),1.0 s)和(49.0 Hz, 10 s)^[22]。

考虑工况的不确定性。工况 L_1 为冬大方式下的极限负荷水平,97 机 462 节点,其中负荷节点数 177;工况 L_2 是冬大方式下的期望负荷水平,89 机 462 节点,其中负荷节点数 177。其发电出力、负荷及概率见附录 A 表 A1。动态负荷采用感应电动机的三阶机电暂态模型。静态负荷 ZIP 模型中,恒阻抗、恒电流及恒功率负荷的比例为 0.35 : 0 : 0.65。有功和无功的频率调节系数 K_{LP} 和 K_{LQ} 分别为 1.8 和 -2.0。

2)故障集

对上述两个工况下所有的短路故障及单厂全停故障穷尽式仿真,将存在电压或频率不安全现象的 5 个故障纳入故障集,见附录 A 表 A2。在缺乏实际系统统计值的情况下,各故障的概率可按一般采用值设置。

3)LS 的代价

取可中断负荷^[23]的容量为系统实际配置 UFLS 的 41.64%,停电代价为 1 万元/(MW·h);不可中断负荷占母线负荷的 30%,负荷违约停电代价^[24]为 5 万元/(MW·h)。停电时间统一为 1 h。

6.1.2 布点寻优结果的比较

在观察动态负荷对 UVLS 布点优化的影响时,动态负荷占比分别取为 0%,5%,10% 和 15%。在观察动态负荷对 UFLS 布点优化的影响时,则有意增加了动态负荷的占比,分别取为 0%,30% 和 50%。

两者优化的结果及其寻优的详细过程见附录 B。对两者优化结果的强壮性校核分别见表 1 及表 2,其详细的校核过程见附录 C。其中的计算量用稳定分析的次数来反映(下同)。不难看出,动态负荷的占比对 UVLS 布点优化的影响较大,而对 UFLS 布点优化的影响则几乎可以忽略。

表 1 UVLS 布点结果强壮性校核

Table 1 Robustness calibration of UVLS placement

动态负荷占比/%	风险 $R/(万元 \cdot a^{-1})$	稳定分析次数 B
0	7.96	521
5.00	6.38	490
10.00	6.37	496
15.00	6.36	491

表 2 UFLS 布点结果强壮性校核

Table 2 Robustness calibration of UFLS placement

动态负荷占比/%	风险 $R/(万元 \cdot a^{-1})$	稳定分析次数 B
0	14.84	1 127
30.00	14.84	1 138
50.00	14.82	1 137

针对多个系统测算,负荷模型中计及动态负荷,其数值积分的计算量一般是只考虑静态负荷的 1.5~2.0 倍,故表 1 及表 2 中,动态负荷占比不为零值时的计算量与其占比为零值时的计算量之比,应该是相应 B 值之比的 1.5 倍。

6.1.3 优化结果的分析

取文献[4]的全局优化布点方法对应的风险值及计算量做基准。对 UVLS 布点,不计动态负荷时,其风险值和计算量分别为基准值的 1.25 倍和 71%。其风险明显增加,不能满足工程要求,故必须考虑动态负荷。对 UFLS 布点,不计动态负荷时,其风险值非常接近基准值,而计算量只有基准值的 66%。故对只出现暂态频率不安全的 UFLS 布点优化时,可只采用静态负荷模型。

6.2 频率贡献度的简化求取

6.2.1 计算场景

仿真系统、工况、安全约束二元表和停电代价设与 6.1 节相同,本节研究 UFLS 灵敏度更新的简化,故附录 A 表 A2 中 5 个故障中只有 F_4 和 F_5 与之相关。

6.2.2 频率贡献度简化处理的影响

在求取综合贡献度并优化 UFLS 布点时,分别采用 4 种方式,即每次迭代都更新 TDLS 母线的控制灵敏度,仅前 3 次迭代更新灵敏度,仅前 2 次迭代更新灵敏度,仅首次迭代更新灵敏度的方式。其优化结果的风险和稳定分析次数如表 3 所示。

表 3 工况不确定性下各方式比较

Table 3 Comparison of methods under uncertain conditions

灵敏度的更新方式	风险 $R/(万元 \cdot a^{-1})$	$\Delta R/\%$	稳定分析次数 B	$-\Delta B/\%$
每次迭代都更新	11.85	0	1 127	0
仅前 3 次迭代更新	11.87	0.17	1 035	8.16
仅前 2 次迭代更新	11.89	0.34	864	23.34
仅首次迭代更新	12.10	2.11	517	54.13

在首次迭代时,某些 TDLS 母线可能对频率的贡献度较低,甚至为负(即控制负效应)。因此,仅首次迭代更新灵敏度的方式,忽视了这些母线在后续迭代中的贡献度增加的可能。因此,其控制风险代价增加较多。而第二次迭代及以后,UFLS 控制的负效应一般不再会出现,故仅前 2 次迭代更新灵敏度的方式的风险代价就非常接近最小值,其计算精度非常接近文献[4]的每次迭代都更新的结果。类似地,若进一步考虑了 ZIP 比例及 K_{LP} 的不确定性(详见附录 A 表 A3 及 A4,附录 D 表 D1 及 D2),可以得到相同的结论。

随着不确定性的增加,布点优化的计算量急剧

增加,仅前 2 次迭代更新灵敏度方式所需的计算量就显得格外重要。

6.2.3 优化结果的分析

图 3 以稳定分析(积分)次数反映计算量,并取为横坐标,而取控制风险为纵坐标,比较了 UFLS 布点的各方式的综合效果。不难看出,仅更新前 2 至 3 次,控制风险就很接近每次迭代都更新的结果。图 3(a)用有名值反映了不同方式在各不确定性因素下的优化结果;图 3(b)至(d)则以每次迭代都更新方式的结果为基准。

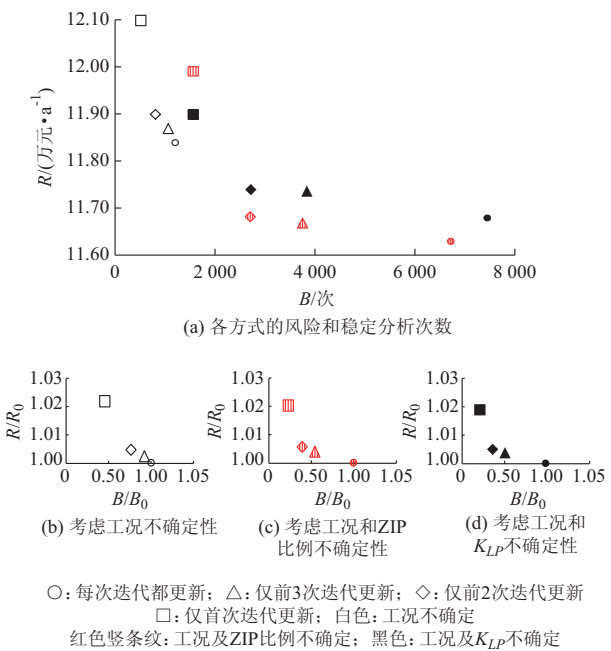


图 3 UFLS 布点结果的各方式比较
Fig.3 Comparison of simplified methods in UFLS placement

由图 3 可见,灵敏度更新次数的增加有可能改进简化算法的优化效果,但计算量也随之加大。从代表某简化方式的点出发,连接到代表未简化方式的点的直线越接近水平线,则简化的综合效果越好。不难看出,在不同的不确定因素下,仅在前两次迭代中更新灵敏度的方式都有最好的简化效果。

同样,可以观察到:图 3(c)及(d)比图 3(b)考虑的不确定性因素增加,而简化的综合效果随之提高。说明要考虑的场景数越多,简化越有效。

6.3 UFLS 与 UVLS 协调布点的简化

6.3.1 计算场景

为了使电压及频率都可能不安全,取山东省网冬大方式下的另一种工况 L,81 机 462 节点,负荷数 177,详见附录 A 表 A5。设定的安全约束二元表及停电代价同 6.1 节。故障集中包括电压和频率均不安全者,见附录 A 表 A6。在 6.2 节基础上增加考虑 ZIP 比例的不确定性,见附录 A 表 A7。

6.3.2 不同协调方案的效果

表 4 比较了不同的协调优化方案,包括:①在 UFLS 布点及 UVLS 布点这两个优化子问题的外部迭代至收敛的方案,作为比较的基准;②只在两个优化子问题的外部单次迭代的方案;③本文第 5 节建议的简化的协调方案,即在子问题优化初解的基础上通过替代来考虑 TDLS 母线对两个子问题的综合改善效果。从表中可见:该简化方案对应的控制风险较单次迭代方案低,很接近完整迭代方案,而计算量则较完整迭代方案大幅降低。

为了观察负荷 ZIP 比例不确定的影响,分别取其离散分布为 2 档及 3 档,布点结果的比较见附录 E 表 E1 及表 E2。在同时考虑 ZIP 比例和 K_{LP} 的不确定性时,离散分布均取为 3 档,布点结果的比较见附录 E 表 E3。不难看出,在多种不确定性的场景下的结论与单一场景下相似。

6.3.3 优化结果的分析

图 4(a)用有名值反映了不同方案在各不确定性场景下的优化结果;图 4(b)一图 4(e)则以完整的迭代方案的结果为基准。

不难看出,完整的迭代方案的总风险最小,而计算量最大;外部单次迭代方案的计算量大幅减少,但总风险最大;在子问题优化初解的基础上通过替代来简化的协调方案只比单次迭代方案少许增加计算量,却大幅提高了计算精度,简化效果良好。

随着不确定性场景的增加,各方式的计算量均显著增加。其中完整的迭代方案的计算量增加最快,而简化的协调方案的标么计算量反而下降。从代表该简化方案的点出发,连接到代表基准方案的点的直线最接近水平线,简化的综合效果很好。

表 4 不同协调方案的效果
Table 4 Results of different coordinated schemes

协调优化布点	UFLS 风险 $R/$ (万元·a ⁻¹)	UVLS 风险 $R/$ (万元·a ⁻¹)	总风险 $R/$ (万元·a ⁻¹)	$\Delta R/\%$	稳定分析次数 B	$-\Delta B/\%$
完整的迭代方案	2.72	4.73	7.45	0	443	0
单次迭代方案	3.15	4.75	7.90	5.90	197	55.50
简化的协调方案	2.43	5.19	7.62	2.14	233	47.40

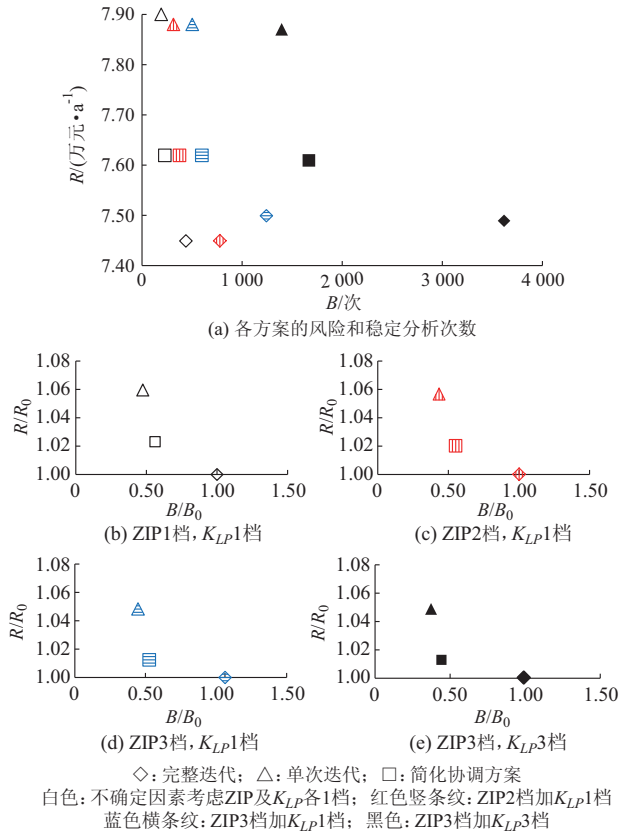


图4 各协调优化布点方案的比较

Fig.4 Comparison of coordinated and optimized placement schemes

7 结语

本文综合考虑了负荷模型对布点优化的计算量和精度的影响,在满足工程应用精度的前提下尽可能地简化算法。研究表明在满足工程需要的精度的前提下:①UFLS布点可以不考虑动态负荷;②在求取UFLS候选布点的灵敏度时,采用仅在前两次迭代中更新灵敏度方式来更新贡献度,可减少超过一半的计算量;③在协调优化布点中,采用替代优化可以减少迭代次数,计算量下降大约50%。但在不确定性因素及其联合分布复杂性进一步增加时,如何协调计算量和布点结果的强壮性仍需不断改进。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(一)从孤立防线到综合防御[J].电力系统自动化,2006,30(1):8-16.
 XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part I from isolated defense lines to coordinated defending[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006,

30(1): 8-16.
 [2] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(二)广域信息、在线量化分析和自适应优化控制[J].电力系统自动化,2006,30(2):1-10.
 XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part II reliable information, quantitative analyses and adaptive controls [J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(2): 1-10.
 [3] 薛禹胜.时空协调的大停电防御框架:(三)各道防线内部的优化和不同防线之间的协调[J].电力系统自动化,2006,30(3):1-10.
 XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts; Part III optimization and coordination of defense-lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(3): 1-10.
 [4] 任先成,薛禹胜,WU Q H,等.低频低压切负荷布点及轮次的优化与协调[J].电力系统自动化,2009,33(11):1-7.
 REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of UFLS/UVLS placement and multi-step load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 1-7.
 [5] 熊小伏,周永忠,周家启.计及负荷频率特性的低频减载方案研究[J].中国电机工程学报,2005,25(19):48-51.
 XIONG Xiaofu, ZHOU Yongzhong, ZHOU Jiaqi. Study of under-frequency load shedding scheme based on load frequency characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 48-51.
 [6] TERZIJA V V. Adaptive under-frequency load shedding based on the magnitude of the disturbance estimation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1260-1266.
 [7] VAN CUTSEM T, MOORS C, LEFEBVRE D. Design of load shedding schemes against voltage instability using combinatorial optimization[C]// Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting; Vol 2, January 27-31, 2002: 1-7.
 [8] 王达,薛禹胜,WU Q H,等.故障驱动切负荷和轨迹驱动切负荷的协调优化[J].电力系统自动化,2009,33(13):1-6.
 WANG Da, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of fault-driven load shedding and trajectory-driven load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 1-6.
 [9] 薛禹胜.EEAC和FASTEST[J].电力系统自动化,1998,22(9): 25-30.
 XUE Yusheng. EEAC and FASTEST [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 25-30.
 [10] 薛禹胜,刘强,DONG Zhaoyang,等.关于暂态稳定不确定性分析的评述[J].电力系统自动化,2007,31(14):1-6.
 XUE Yusheng, LIU Qiang, Dong Zhaoyang, et al. A review of non-deterministic analysis for power system transient stability [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.
 [11] 任先成,薛禹胜,WU Q H,等.低频低压切负荷的控制负效应及其机理[J].电力系统自动化,2009,33(10):1-5.
 REN Xiancheng, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Negative

effects and their mechanisms analysis of UFLS and UVLS controls[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10): 1-5.

[12] 段献忠,包黎昕.电力系统电压稳定分析和动态负荷建模[J].电力系统自动化,1999,23(19):25-28.

DUAN Xianzhong, BAO Lixin. Voltage stability analysis and dynamic load modeling for power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(19): 25-28.

[13] 林舜江.负荷特性的建模及其对电压稳定的影响研究[D].长沙:湖南大学,2008.

[14] 孙华东,周孝信,李若梅.感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J].电网技术,2005,29(23):1-6.

SUN Huadong, ZHOU Xiaoxin, LI Ruomei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability [J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 1-6.

[15] EL SADEK M Z, ABDELBARR F N. Effects of induction motor load in provoking transient voltage instabilities [J]. Electric Power Systems Research, 1989, 17(2): 119-127.

[16] BEGOVIC M M, PHADKE A G. Dynamic simulation of voltage collapse[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1990, 5(4): 1529-1534.

[17] PAL M K. Voltage stability conditions considering load characteristics [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1): 243-249.

[18] XUE Y, XU T, LIU B, et al. Quantitative assessments of transient voltage stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(3): 1077-1083.

[19] 韩桢祥.电力系统稳定[M].北京:中国电力出版社,1995.

[20] TAYLOR C W. Concepts of under-voltage load shedding for voltage stability[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(2): 480-488.

[21] 袁季修.电力系统安全稳定控制[M].北京:中国电力出版社, 2003.

[22] DL 755—2001 电力系统安全稳定导则[S].北京:中国电力出版社,2001.

[23] WANG P, BILLINTON R. Optimum load shedding technique to reduce the total customer interruption cost in a distribution system[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(1): 51-56.

[24] 罗运虎,薛禹胜,EDWICH G L,等.低电价与高赔偿2种可中断负荷的协调[J].电力系统自动化,2007,31(11):17-21.

LUO Yunhu, XUE Yusheng, EDWICH G L, et al. Coordination of low price interruptible load and high compensation interruptible load [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(11): 17-21.

薛禹胜(1941—),男,通信作者,中国工程院院士,博士生导师,主要研究方向:电力系统自动化。E-mail: xueyusheng@sgepri.sgcc.com.cn

戴元煜(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:电力系统相继故障和切负荷优化。E-mail: dyy860209@163.com

任先成(1980—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: renxiancheng@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 杨松迎)

Simplification of Optimization and Coordination Algorithm for Trajectory-driven Load-shedding Placement

XUE Yusheng^{1,2}, DAI Yuanyu^{2,1}, REN Xiancheng¹, YU Wenjie^{1,3}, NI Ming¹, YUE Dong⁴

- (1. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China;
- 2. School of Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China;
- 3. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;
- 4. Institute of Advanced Technology, Nanjing University of Post and Telecommunication, Nanjing 210003, China)

Abstract: With the increase of scale of power systems and uncertainties, the computational burden of optimization and coordination of trajectory-driven load-shedding (TDLS) placement is aggravated. In consideration of the impact of load model uncertainty on computational burden and optimization accuracy, the feasibility of using the simplified load model in TDLS placement optimization is studied. Meanwhile, the current optimization and coordination algorithm of TDLS placement has been improved, including reducing iterations and the update frequency of sensitivity. Simulation results show that the simplified method doesn't have significant impact on optimization accuracy. But, with greatly reduced computational burden, the method is readily applicable to engineering projects.

This work is jointly supported by National Basic Research Program of China (973 Program) (No. 2013CB228204), Australian Research Council Project (No. DP120101345), NSFC-EPSRC Collaborative Project (No. NSFC-513111025-2013, No. EPSRC-EP/L001063/1), and State Grid Corporation of China.

Key words: load shedding; transient voltage stability; transient frequency stability; load model; uncertainty; contribution of placement; control risk; sensitivity analysis