

考虑分布式电源支撑作用的输配电系统协同恢复方法

李长城¹,和敬涵²,王颖²,马佳骏²,祝士焱²,许寅²,刘家好³

(1. 广西大学 电气工程学院,广西 南宁 530004;2. 北京交通大学 电气工程学院,北京 100044;
3. 国网上海市电力公司电力科学研究院,上海 200437)

摘要:随着高密度分布式电源不断接入配电系统,配电系统向上支撑大电网恢复成为可能。首先,结合高密度分布式电源对电力系统分区并行恢复的促进作用,分析含分布式电源的大电网恢复分区需要满足的基本条件。然后,针对含高密度分布式电源的大电网待恢复子区,考虑相关运行约束等,构建输配电系统协同恢复的双层混合整数线性规划(MILP)模型。其中,上层输电系统恢复模型以最大化机组输出能量和负荷恢复为目标;下层配电系统恢复模型以最大化加权关键负荷恢复数目为目标。其次,提出考虑输、配电网调度中心协同的双层MILP模型解耦求解策略,解耦后模型可以分别在输、配电网调度中心利用成熟商业优化软件求解,从而实现含高密度分布式电源的输配电系统的协同恢复,提升恢复效果。最后,利用改进的IEEE 14节点输电测试系统和IEEE 13节点配电测试系统构建输配电系统算例,仿真验证所提方法的有效性。

关键词:电力系统;协同恢复;输配电系统;分布式电源;韧性

中图分类号:TM 71

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202110035

0 引言

近年来,世界范围内发生的大停电事件使得电力系统恢复问题备受关注。科学有效的电力系统恢复方法能够缩短系统停电时间、减小停电损失,对提升能源安全水平具有重要意义^[1-2]。电力系统恢复的主要目标按时序划分依次为尽快启动停电电源,快速建立基本网架,并最大限度地恢复关键负荷^[3-4]。

一般而言,火力发电机组、水轮机组等传统的大型发电机组与输电网相连,向输电网直接提供电能;而工业、商业、居民用电等终端负荷则主要接入配电网中。考虑到输电、配电系统在实际运行调度与管理中是独立的,且传统的配电系统主要是从输电系统获得电能,因此已有的研究成果通常对输电系统恢复问题与配电系统恢复问题分别建模并独立求解。在输电系统恢复研究中,通常将配电网的关键负荷等效为一个聚合的负荷接入输电网变电站节点,进而决策机组启动次序和关键负荷的恢复次序。这类问题被转化为以电源启动时间最短、恢复功率最大等为目标的多阶段优化问题,可运用数学规划^[5-6]、启发式算法^[7-8]、机器学习^[9]、专家系统^[10]等方法求解。但这类问题的核心目标是快速启动电源,往往忽略了配电网中关键负荷的详细恢复过程。配电系统的恢复需要等待大电网与配电网输电通路恢

复完成后,将输电系统等效为无穷大电源,并通过输电变电站馈出至配电网的线路(本文定义为配电馈线)与配电网相连,进行关键负荷的恢复决策。近年来,接入配电系统的分布式电源逐渐趋向于高密度,使得配电网恢复并不局限于被动等待大电网送电。很多学者已经开始探索利用配电网本地分布式电源恢复网内关键负荷^[10-13],笔者在前期工作中采用多源协同的恢复思路,在时间和空间层面充分协同网内分布式电源恢复关键负荷,形成较大的电气孤岛,实现能量的优化配置^[13]。含高密度分布式电源的配电网具备向上支撑大电网恢复的潜力,而传统输配电系统“自上而下”的独立恢复难以考虑支撑大电网恢复。

利用含高密度分布式电源的配电网向上支撑大电网恢复实现输配电系统协同恢复具有以下优势。

1)含分布式电源的配电系统可以在恢复初期向输电系统恢复提供能量,改变了以往“自上而下”或“自下而上”的单一恢复方式,实现总能量的统筹分配,可加快恢复进程^[14-16]。

2)对于大型互联电力系统,大停电后通常在输电系统层面采用分区并行恢复的策略,以缩短整体的恢复时间^[17]。含分布式电源的配电系统具备自启动能力,可以作为黑启动电源,从而增加输电系统恢复分区的数目,提高分区并行恢复的效率。

文献[14-16]初步探索了利用含分布式电源的配电系统支撑大电网恢复的技术,提出了输配电系统协同恢复关键负荷的方法。考虑到电力系统一旦发生大停电,首要的恢复任务应该是快速启动输电系统中的大型发电机组,同时恢复配电系统的部分关键负荷以平衡系统出力。因此,本文主要研究采用大电网多分区并行恢复策略的前提下,含分布式

收稿日期:2021-02-28;**修回日期:**2021-09-06

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297069);
国网上海市电力公司资助项目(SGSHDK00SPJS2000491)

Project supported by Guangxi Natural Science Foundation(2020GXNSFBA297069) and the Project of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company (SGSHDK00SPJS2000491)

电源子区内的输配电系统协同恢复方法,主要目标是在机组启动阶段,充分协同输配电系统资源,快速启动恢复输电系统中的大型机组,并大量恢复配电系统的关键负荷。

1 问题描述

大型电力系统发生大停电后,通常采用分区并行恢复的策略进行供电恢复。各个子区在其独立恢复的过程中应尽快启动区内停电机组、恢复区内关键负荷,以加快子区间重新互联时机的到来。

对于一个大型电力系统,大型发电机组(或电厂)通常接入其输电层面,而负荷以及分布式电源主要接入配电层面。考虑到配电系统开环运行的特点,互联电力系统的分区主要体现在输电系统层面,即在输电系统中确定分区的边界线路。本文定义停电后由电力系统分区形成的子区为恢复子区。

由于传统的配电系统缺乏本地电源,其恢复过程所需的能量只能通过配电馈线从输电系统获取,因此仅含这类配电系统的恢复子区,通常采用先恢复输电系统后恢复配电系统的“自上而下”恢复方式。输配电系统协同恢复示意图如图1所示。如图中的子区2所示,该子区的配电系统为传统配电系统,只能首先利用水电站作为黑启动电源恢复输电系统,继而逐步向下恢复各个配电系统。而含分布式电源的配电系统,既可以利用分布式电源恢复本地的负荷,也可以通过配电馈线向输电系统提供能量支撑输电系统恢复,如图1的子区1所示。在该子区恢复的初期,由于输电系统没有黑启动电源提供黑启动能量,因此可以由配电系统通过配电馈线向

输电系统提供能量,该期间的恢复方式为“自下而上”^[11]。当输电系统已经完全恢复,或恢复至足够强壮并具备向配电系统输送能量时,配电系统将可以同时利用通过配电馈线获得的能量以及本地的分布式电源对本地关键负荷进行后续恢复。因此,在同一个恢复子区内,输电系统恢复与配电系统恢复在时间上存在同步性,2层恢复过程存在相依性。其中,输电层的主要恢复目标是启动停电机组,使得区内系统尽快获得大量的能量用于恢复配电网;配电层的主要恢复目标是恢复关键负荷,减小停电损失。由于分布式电源吸收无功功率的能力有限,因此分布式电源作为黑启动电源的应用场景会受到更多限制,包括要求所在配电网电压的等级范围不宜太多、与待启动的非黑启动机组距离不宜太长等。由文献[18]可知,含分布式电源的微电网具备辅助约16.09344 km外50 MW燃煤机组启动的能力。

实际中,电网公司首先根据电网的结构特点和并行恢复的基本要求制定分区方案^[19-20],然后再制定每个子区的恢复策略。因此,考虑分布式电源的支撑作用,含分布式电源的恢复子区应满足以下基本条件。

1)各恢复子区具备自恢复能力,可利用接入输电层面的黑启动机组,或者利用接入配电层面的分布式电源获得黑启动资源。因此,恢复子区的数目不应超过黑启动电源数目。若同一个子区内存在多个黑启动电源,在恢复决策中通常仅保留1个黑启动电源的黑启动作用,其余具备黑启动能力的电源则被当作启动时间、启动功率均为0的非黑启动电源。因此,为了提高并行恢复效率,通常考虑恢复子区内有且仅有1个黑启动电源的情况,从而得到最大的恢复子区数量。

对于一个包含有 N_G 台发电机组、 N_{DG} 个分布式电源的恢复子区,所连接的含分布式电源的配电网可以等效作为该子区的黑启动电源,此时,分布式电源应满足如下条件:

$$\sum_{d=1}^{N_{DG}} P_{\max, d} T_{\min} \geq \max_{g \in N_G} (P_{SR, g} T_{Start, g}) \quad (1)$$

$$\sum_{d=1}^{N_{DGst}} P_{\max, d} \geq \max_{g \in N_G} (P_{SR, g}) \quad (2)$$

式中: $P_{SR, g}$ 为区内输电层发电机组 g 的启动需求功率; $T_{Start, g}$ 为发电机组 g 的启动过程所需时间; $P_{\max, d}$ 为区内分布式电源 d 的最大出力; $T_{\min}$ 为区内分布式电源最短的出力时间,即所有分布式电源可以维持同时出力的最长时间; N_{DG} 为所有在线分布式电源数量,电源类型包括分布式同步发电机和电池类电源; N_{DGst} 为出力时间大于 $T_{Start, g}$ 的分布式电源数量。

式(1)约束了子区内分布式电源总能量的最低要求。式(2)约束了子区内平稳输出功率的分布式

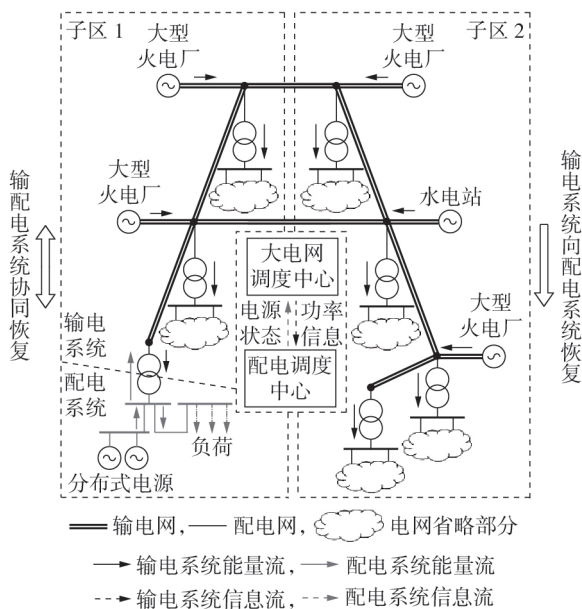


图1 输配电系统协同恢复示意图

Fig.1 Schematic diagram of coordinated restoration of transmission and distribution systems

电源容量,以保证启动需求功率最大的待启动发电机组完成启动过程,一旦该发电机因意外原因无法启动,则子区内分布式电源容量仍然能够满足其他任意1台发电机组启动。因此,以上约束能够保证任意1个恢复子区内的分布式电源总容量至少能够为1台发电机组提供启动支撑。

2)每个恢复子区满足拓扑连通性,并至少包含1个配电网,而1个配电网仅属于1个恢复子区。

3)每个恢复子区的电源额定容量总和满足区内所有关键负荷的恢复供电的要求,即:

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{\max, g} + \sum_{d=1}^{N_{DG}} P_{\max, d} \geq \sum_{l=1}^{N_L} D_l \quad (3)$$

式中: $P_{\max, g}$ 为发电机组 g 的最大出力; D_l 为关键负荷 l 的有功功率需求; N_L 为子区内关键负荷节点数量。

4)恢复子区间的并列点配置了同期并列合闸,因此分区边界必须为输电线路,而不能为变压器支路。

$$S_{bd} \subseteq S_{tl} \quad (4)$$

式中: S_{bd} 为不同子区间的联络线集合; S_{tl} 为系统内的传输线路集合。

电网调度中心在系统发生大停电后,立即根据停电的实际情况和上述基本条件对待恢复的电网进行分区。考虑到停电发生过程中存在部分节点或支路受到严重损坏而无法短时间修复的现象,这类节点或支路不被划分至任意1个恢复子区。本文研究的输配电系统协同恢复方法将在调度中心确定分区方案后执行。

2 输配电系统协同恢复决策模型与求解方法

本文针对含分布式电源的恢复子区,建立一个输配电系统协同恢复的双层优化模型:上层的输电系统恢复模型由大电网调度中心求解,并决策出每个时刻配电馈线的传输功率;下层的配电系统恢复模型则根据大电网调度的指令求解恢复策略。

2.1 输电系统恢复模型

本文采用分时段建模的思想,将恢复问题建模为离散化多时段优化问题。

2.1.1 目标函数

输电系统恢复的目标是发电机组发电能量最大化,同时尽可能长时间地向配电网提供充足的能量保证支撑其恢复过程顺利进行,即:

$$\max f = \sum_{g=1}^{N_G} \sum_{t \in T} P_{G, g}^t + \omega \sum_{t \in T} P_{FD}^t \quad (5)$$

式中: T 为所有决策时段的集合; $P_{G, g}^t$ 为发电机组 g 在时段 $t (t \in T)$ 的输出功率; P_{FD}^t 为配电馈线在时段 t 的传输功率,以输电系统向配电系统传输方向为正方向; ω 为权重系数,可由用户自定义,设置不同数值可以得到不同的恢复策略,在输电网层的恢复中,停电机组的恢复是系统恢复策略的主要目标,因此, ω 值

的设置不应造成式(5)等号右侧的第2项大于第1项。

2.1.2 约束条件

1)拓扑连接性约束。

(1)非黑启动机组必须在所连接节点恢复后才能启动,即:

$$k_i^t \leq a_i^t \quad i \in B \quad (6)$$

式中: k_i^t 为节点 i 所连接机组在时段 t 的启动决策变量,若节点 i 连接的机组在时段 t 已启动,则 $k_i^t = 1$, 否则 $k_i^t = 0$; a_i^t 为节点 i 在时段 t 的恢复决策变量,若节点 i 在时段 t 已恢复,则 $a_i^t = 1$, 否则 $a_i^t = 0$; B 为输电系统节点集合,其元素个数为 N_B 。

(2)线路恢复通过其两端节点恢复来表示:

$$\beta_{ij}^t \leq a_i^t, \beta_{ij}^t \leq a_j^t \quad (i, j) \in B_R \quad (7)$$

式中: β_{ij}^t 为时段 t 输电系统线路 (i, j) 的恢复决策变量,若线路 (i, j) 恢复则 $\beta_{ij}^t = 1$, 否则为 0; B_R 为输电系统线路集合。

(3)节点所连接线路至少已恢复1条,该节点才能被恢复,即:

$$a_i^t \leq \sum_{j=1, j \neq i}^{N_B} \beta_{ij}^t \quad (8)$$

(4)负荷在所连接节点恢复后才能恢复,即:

$$y_i^t \leq a_i^t \quad (9)$$

式中: y_i^t 为时段 t 节点 i 的负荷恢复决策变量,若节点 i 连接的负荷恢复则 $y_i^t = 1$, 否则为 $y_i^t = 0$ 。

2)机组有功出力约束。

传统大型发电机组通用出力特性曲线如图2所示。图中, t_1 为机组的启动时刻; t_2 为机组启动过程结束并开始并网出力的时刻; t_3 为机组达到最小出力 $P_{\min}$ 的时刻; $P_{\max}$ 为机组最大出力; P_{SR} 为机组的启动需求功率; r 为机组的爬坡率。

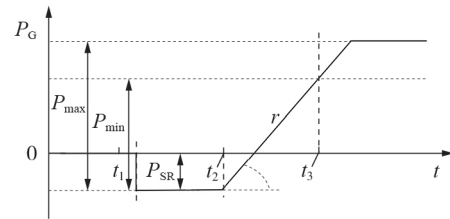


图2 机组出力特性曲线

Fig.2 Output characteristic curve of generating unit

根据机组出力特性,可以得到节点 i 连接的机组在不同阶段的出力约束,具体如下。

(1)若该机组启动并恢复至 $t_{3,i}$ 之前,则其输出功率恒为:

$$P_{G, i}^t = \max \left[\sum_{t \in T} k_i^t - (t_{2,i} - t_{1,i}), 0 \right] r_i - P_{SR, i} \quad (10)$$

式中: r_i 为机组 i 的爬坡率。

(2)若该机组启动并恢复至 $t_{3,i}$ 之后,则其输出功率可以在最小值 $P_{\min, i}$ 和最大值 $P_{\max, i}$ 之间调整。采用

大 M 法,将机组出力约束转化为线性模型,具体如下:

$$-(k_i^t + \xi_i^t + \delta_i^t)M \leq P_{G,i}^t \leq (k_i^t + \xi_i^t + \delta_i^t)M \quad (11)$$

$$\frac{\sum_{t \in T} k_i^t - \frac{t_{2,i} - t_{1,i}}{\Delta T}}{|T|} \leq \xi_i^t \leq \frac{\sum_{t \in T} k_i^t - \frac{t_{2,i} - t_{1,i}}{\Delta T} - 1}{|T|} + 1 \quad (12)$$

$$\frac{\sum_{t \in T} k_i^t - \frac{t_{3,i} - t_{1,i}}{\Delta T}}{|T|} \leq \delta_i^t \leq \frac{\sum_{t \in T} k_i^t - \frac{t_{3,i} - t_{1,i}}{\Delta T} - 1}{|T|} + 1 \quad (13)$$

$$r_i \sum_{t \in T} \xi_i^t - k_i^t P_{SR,i} - \delta_i^t M \leq P_{G,i}^t \leq r_i \sum_{t \in T} \xi_i^t - k_i^t P_{SR,i} + \delta_i^t M \quad (14)$$

$$-(1 - \delta_i^t)M + P_{\min,i} \leq P_{G,i}^t \leq (1 - \delta_i^t)M + P_{\max,i} \quad (15)$$

式中: ΔT 为决策的时间间隔; $|T|$ 表示集合 T 的元素个数; ξ_i^t, δ_i^t 均为0-1决策变量, ξ_i^t 取值为1、0分别表示该机组启动时间达到、未达到 $t_{2,i}$, δ_i^t 取值为1、0分别表示该机组启动时间达到、未达到 $t_{3,i}$; M 为一个很大的正实数,例如9 999。式(11)保证了该机组启动前的功率输出为0;式(12)、(13)分别用于确定该机组启动是否达到其 $t_{2,i}, t_{3,i}$;式(14)和(15)共同确定该机组在不同阶段的出力范围。

3) 机组爬坡率约束。

$$-r_i \Delta T \leq P_{G,i}^t - P_{G,i}^{t-1} \leq r_i \Delta T \quad (16)$$

4) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_B} (P_{G,i}^t - D_i^t) - P_{FD}^t = 0 \quad (17)$$

式中: D_i^t 为节点 i 在时段 t 连接的负荷已恢复量。

5) 已恢复设备不再停电约束。

$$\begin{cases} k_i^t \leq k_i^{t+1} \\ a_i^t \leq a_i^{t+1} \\ y_i^t \leq y_i^{t+1} \\ \beta_{ij}^t \leq \beta_{ij}^{t+1} \end{cases} \quad (18)$$

本文假设满足恢复要求的恢复操作均成功,且要求所有已恢复的设备不进行退出操作。

2.2 配电系统恢复模型

2.2.1 目标函数

配电系统恢复的目标是尽快恢复网内更为关键的负荷并尽可能长时间地向已恢复的关键负荷提供充足的能量。

$$\max f_2 = \sum_{t \in T} \sum_{l \in L} \omega_l \gamma_l^t \quad (19)$$

式中: L 为所有负荷节点构成的集合; ω_l 为负荷 l 的权重系数; γ_l^t 为负荷 l 在时段 t 的状态,负荷为恢复状态则 $\gamma_l^t = 1$,否则 $\gamma_l^t = 0$ 。

2.2.2 约束条件

1) 潮流约束。

$$\sum_{k: k \rightarrow i} \mathbf{A}_{ki}^t + \mathbf{s}_i^t = \sum_{j: i \rightarrow j} \mathbf{A}_{ij}^t \quad i \in \Omega_N, t \in T \quad (20)$$

$$\mathbf{S}_{ij}^t = \boldsymbol{\kappa} \text{diag}(\mathbf{A}_{ij}^t) \quad i \rightarrow j \in \mathcal{E}, t \in T \quad (21)$$

$$\begin{cases} -(1 - a_{ij})M \leq \mathbf{V}_i^t - \mathbf{V}_j^t - [\mathbf{Z}_{ij}^H \mathbf{S}_{ij}^t + (\mathbf{S}_{ij}^t)^H \mathbf{Z}_{ij}] \\ \mathbf{V}_i^t - \mathbf{V}_j^t - [\mathbf{Z}_{ij}^H \mathbf{S}_{ij}^t + (\mathbf{S}_{ij}^t)^H \mathbf{Z}_{ij}] \leq (1 - a_{ij})M \end{cases} \quad i \rightarrow j \in \mathcal{E}, t \in T \quad (22)$$

$$\begin{cases} -a_{ij}(M + jM) \mathbf{A}_{3,1} \leq \mathbf{A}_{ij}^t \\ \mathbf{A}_{ij}^t \leq a_{ij}(M + jM) \mathbf{A}_{3,1} \end{cases} \quad i \rightarrow j \in \mathcal{E}, t \in T \quad (23)$$

$$\text{sum}(\mathbf{s}_i^t + \mathbf{s}_{\text{load},i} \boldsymbol{\gamma}_i^t) = \mathbf{s}_{s,i}^t \quad i \in \Omega_N, t \in T \quad (24)$$

$$\boldsymbol{\kappa} = \begin{bmatrix} 1 & \beta^2 & \beta \\ \beta & 1 & \beta^2 \\ \beta^2 & \beta & 1 \end{bmatrix}$$

式中: $\boldsymbol{\kappa}$ 为转换矩阵; $\beta = e^{j2\pi/3}$; Ω_N 和 $\mathcal{E}$ 分别为配电网在时段 t 所有节点和所有线路组成的集合; $i \rightarrow j \in \mathcal{E}$ 表示所有从节点 i 到节点 j 的有向边; $j: i \rightarrow j$ 表示节点 i 下游所有节点 j 构成的集合; $k: k \rightarrow i$ 表示节点 i 上游所有节点 k 构成的集合; $\mathbf{A}_{ki}^t = \text{diag}(\mathbf{S}_{ki}^t)$, $\text{diag}(\cdot)$ 表示取矩阵的对角线元素构造对角矩阵, $\mathbf{S}_{ki}^t = \mathbf{v}_k^t (\mathbf{i}_{ki}^t)^*$ 为配电系统线路 ki 在时段 t 的三相复数功率变量矩阵, $\mathbf{v}_k^t$ 为节点 k 在时段 t 的三相电压相量构成的列向量, $\mathbf{i}_{ki}^t$ 为配电系统线路 ki 在时段 t 的三相电流相量构成的列向量,“*”表示共轭; $\mathbf{s}_i^t$ 为节点 i 在时段 t 的注入复功率向量; $\mathbf{V}_i^t = \mathbf{v}_i^t (\mathbf{v}_i^t)^*$ 为电压变量矩阵; $\mathbf{Z}_{ij}$ 为配电系统线路 ij 的阻抗矩阵; $\mathbf{H}$ 表示取矩阵的厄米特矩阵; a_{ij} 为0-1变量, a_{ij} 取值为1、0分别表示配电系统线路 ij 相连、不相连; $\mathbf{A}_{3,1}$ 为3行元素均为1的列向量; $\mathbf{s}_{s,i}^t$ 为时段 t 内连接在节点 i 的电源向节点 i 注入的复功率,对于配电馈线首端节点, $\text{Re}(\mathbf{s}_{s,i}^t) = P_{FD}^t$; $\mathbf{s}_{\text{load},i}$ 为连接在节点 i 的负荷需求组成的向量; $\text{sum}(\cdot)$ 表示对向量中的元素求和;式(20)表示从节点 i 流出的总功率等于流向节点 i 的功率之和;式(21)表示 $\mathbf{S}_{ij}^t$ 与 $\mathbf{A}_{ij}^t$ 之间的联系;式(22)为欧姆定律和功率定义式的变形,表示两点电压模值平方差的关系;式(23)表示若配电系统线路 ij 不相连,则线路功率为0,否则不作约束;式(24)表示与节点 i 连接的电源发出的功率等于注入节点 i 的功率加上该节点的在线负荷功率。

2) 分布式电源出力约束。

$$\begin{cases} P_{\min,d} \leq p_{s,d}^t \leq P_{\max,d} \\ Q_{\min,d} \leq q_{s,d}^t \leq Q_{\max,d} \end{cases} \quad d \in \Omega_{DG}, t \in T \quad (25)$$

式中: $p_{s,d}^t, q_{s,d}^t$ 分别为在线分布式电源 d 的有功、无功出力; Ω_{DG} 为所有在线分布式电源集合,包括分布式同步发电机和电池类电源; $P_{\min,d}, Q_{\min,d}$ 分别为在线分布式电源 d 的有功、无功最小出力限制; $Q_{\max,d}$ 为在线分布式电源 d 的无功最大出力限制。

3) 分布式电源能量约束。

$$\text{Re} \left(\sum_{t \in T} \Delta T \mathbf{s}_{s,d}^t \right) \leq E_d^0 \quad d \in \Omega_{GD} \quad (26)$$

$$S_{\min,d}^{\text{SOC}} \leq S_{d,0}^{\text{SOC}} - \lambda_d \sum_{t=1}^{t'} \Delta T p_{s,d}^t \leq S_{\max,d}^{\text{SOC}} \quad d \in \Omega_{SD}, t' \in T \quad (27)$$

式中: $\mathbf{s}_{s,d}^t$ 为在线分布式同步发电机 d 的复功率出力; Ω_{GD} 为所有在线分布式同步发电机所构成的集合; Ω_{SD} 为所有在线电池类电源所构成的集合; E_d^0 为在线分布式同步发电机 d 恢复前内部剩余的发电资源的

能量值; $S_{\max,d}^{\text{SOC}}$ 和 $S_{\min,d}^{\text{SOC}}$ 分别为满足电池类电源 d 正常运行的荷电状态上、下限; $S_{d,0}^{\text{SOC}}$ 为初始荷电状态; λ_d 为转换系数, 表征将能量转换为设备 d 的荷电状态; $p_{s,d}^t = \text{Re}(s_{s,d}^t)$, 为电池类电源 d 在时段 t 的注入有功功率; t' 为电池类电源从开始供电到结束供电的持续时间。

4) 节点电压约束。

$$\mathbf{v}_{\min,i} \leq \text{diag}(\mathbf{V}_i^t) \leq \mathbf{v}_{\max,i} \quad i \in \Omega_N, t \in T \quad (28)$$

式中: $\mathbf{v}_{\max,i}$ 和 $\mathbf{v}_{\min,i}$ 分别为节点 i 的由三相电压相量上限和下限构成的向量。

5) 负荷状态约束。

为了保证关键负荷的持续供电, 从用户满意度方面对负荷的状态进行约束, 如式(29)所示, 其表示每个负荷在恢复之后不能重新断开。

$$\gamma_{l,t} - \gamma_{l,t-1} \geq 0 \quad l \in L, t \in T \quad (29)$$

6) 线路热极限约束。

$$\mathbf{C}_{\min,ij} \leq \mathbf{A}_{ij} \leq \mathbf{C}_{\max,ij} \quad i \rightarrow j \in \mathcal{E}, t \in T \quad (30)$$

式中: $\mathbf{C}_{\max,ij}$ 和 $\mathbf{C}_{\min,ij}$ 分别为由配电系统线路 ij 传输功率的热极限上、下限构成的向量。

在配电系统恢复的优化决策模型中, 与分布式电源有关的约束条件包括式(25)—(27), 以及文献[17]中所列的含分布式电源系统的动态约束条件。

2.3 输配电系统协同恢复模型求解

2.1、2.2 节的输配电系统恢复双层优化模型中, 上层输电系统恢复模型和下层配电系统恢复模型均为混合整数线性规划 MILP (Mixed-Integer Linear Programming) 模型, 2 层模型之间的联系在于输配电系统相连的馈线在各时段的交换功率不同。以图 1 中的子区 1 为例。首先, 配电网调度运行中心向大电网调度中心传递分布式电源可用的容量、能量信息, 大电网调度中心将配电系统等效为能量有限的源节点, 求解上层输电系统的恢复策略以及配电馈线各时段的交换功率, 并将交换功率信息发送至配电网调度运行中心; 然后, 配电网运行中心根据从大电网调度中心获得的配电馈线交换功率信息, 将配电馈线连接节点等效为各时段输出功率确定的源节点, 进而求解下层配电系统的恢复策略, 以及确定各时段分布式电源的出力。

3 算例分析

本文基于 MATLAB 平台实现了输配电协同恢复方法, 并采用 1 个 IEEE 14 节点输电测试系统和 2 个 IEEE 13 节点配电测试系统构造输配电系统, 仿真验证本文所提方法的有效性。其中, IEEE 13 节点配电测试系统为标准三相不平衡系统。

3.1 测试系统概述

改进的输配电系统结构图见附录 A 图 A1, 其包含 1 个 14 节点的输电系统和 2 个 13 节点的配电系

统。输电系统共有 5 台发电机组, 其中 G_1 为黑启动机组, 其余均为非黑启动机组, 机组启动特性如表 1 所示; 共有 20 条支路, 包括线路和变压器支路, 假设每条支路的恢复时间均为 5 min。输电系统节点 10 和 11 通过各自的降压变压器、配电馈线与 2 个不同的 IEEE 13 节点配电系统相连。其中, 与节点 11 相连的配电系统为传统的标准 IEEE 13 节点系统; 而与节点 10 相连的配电系统为修改后含分布式电源的 IEEE 13 节点系统, 分布式电源配置等信息如表 2 所示, 储能系统配置如表 3 所示。根据文献[21], 将负荷按照重要等级分为一级、二级和普通负荷 3 级, 其权重分别为 100、10 和 0.2。本算例中, 设置节点 634、671 的负荷为一级负荷, 节点 675、646 的负荷为二级负荷, 其他负荷为普通负荷。

表 1 输电系统发电机组恢复特性数据

Table 1 Restoration feature data of generators in transmission system

机组	$P_{\max,g}/\text{MW}$	$P_{\text{st},g}/\text{MW}$	$r_g/(\text{kW} \cdot \text{h}^{-1})$	$t_{2,g}-t_{1,g}/\text{min}$	$P_{\min,g}/\text{MW}$
G_1	332.4	0	66.6	0	0
G_2	140.0	5.0	82.0	30	24.46
G_3	100.0	4.0	76.0	50	31.75
G_6	100.0	3.0	70.0	40	29.25
G_8	100.0	2.3	84.0	20	26.10

表 2 子区 2 配电系统分布式电源参数

Table 2 Parameters of distributed generations in distribution system of Sub-area 2

同步发电机	$P_{\max,d}/\text{kW}$	$Q_{\max,d}/\text{kvar}$	$E_d^0/(\text{kW} \cdot \text{h})$
DC ₆₃₃	1 200	1 400	2 400
DC ₆₇₁	1 000	1 000	2 000

表 3 子区 2 配电系统储能系统参数

Table 3 Parameters of energy storage systems in distribution system of Sub-area 2

储能系统	$P_{\max,d}/\text{kW}$	$P_{\min,d}/\text{kW}$	$S_{d,0}^{\text{SOC}}$	$S_{d,\max}^{\text{SOC}}$	$S_{d,\min}^{\text{SOC}}$	$\lambda_d/(\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}$
DS ₆₇₅	800	-800	0.2	0.9	0.1	10^{-3}

考虑到含分布式电源的配电网具备自启动的能力, 因此本算例首先对该系统进行分区, 结合第 1 节的分区原则, 可以得到区间边界线路为输电系统线路(2,4)、(3,4)、(4,5)、(10,11)、(13,14), 将系统划分为 2 个子区: 子区 1 以输电系统的 G_1 为黑启动电源, 子区 2 以含分布式电源的配电系统为黑启动电源。2 个子区同时独立地进行恢复。

输电系统恢复的次要目标是尽可能长时间地向配电网提供充足的能量。然而, 待恢复配电网的负荷量可能远小于系统装机总容量, 因此, 为提高输电网与配电网协同恢复的效果, 本文给出一种权重系数的计算方法, 对于一个恢复子区有:

$$\omega = \text{int} \left[\sum_{i=1}^{N_{\text{NB}}} P_{\max,i} / \sum_{z=1}^{N_D} D_{D,z} \right] \quad (31)$$

式中: N_{NB} 为非黑启动机组的数量; $D_{D,z}$ 为配电系统 z 的负荷量; N_D 为配电网数量; $\text{int}[x]$ 表示取 x 的整数部分。本算例可以求得 $\omega=63$ 。设置恢复时间为2 h,以5 min为一个恢复时段,因此本算例中有24个恢复时段。

3.2 输配电系统协同恢复结果

3.2.1 含分布式电源的子区2恢复

配电网通过节点10向该区输电层提供黑启动功率,该区输电系统节点恢复次序为节点10、9、7、8、4。在决策时段4内,配电网通过节点10向发电机组 G_8 提供启动功率2.3 MW,使 G_8 开始启动。由于 G_8 的启动时间 $t_{2,8}-t_{1,8}=20$ min,因此配电系统需要持续20 min向输电系统传输2.3 MW的功率,以保证 G_8 顺利启动成功。在决策时段8内, G_8 完成启动过程,开始逐渐向系统输出功率,此时该区的输电网开始向配电网送电。在决策时段1—8内,流过节点10馈线的功率 P'_{FD} 分别为0、0、0、-2.3、-2.3、-2.3、-2.3、3.6 MW;在决策时段9—24内,配电线路的传输功率均为3.6 MW。在2 h内,发电机输出电能为4564.5 MW·min。

将输电网层计算得到的各个时段馈线功率 P'_{FD} 作为配电网求解约束条件。求解后,各时段负荷恢复结果如表4所示,各时段各电源有功出力结果见图3。图中,电源有功出力为标么值(基准值为1000 kW);各时段均为5 min,后同。

表4 子区2配电系统恢复结果

Table 4 Restoration results of distribution system in Sub-area 2

决策时段	恢复负荷	恢复 负荷量/kW	馈线 功率/kW
1—3	634(一级)/646(二级)	600	0
4—7	634(一级)/646(二级)	600	-2300
8—24	所有负荷	3436	3600

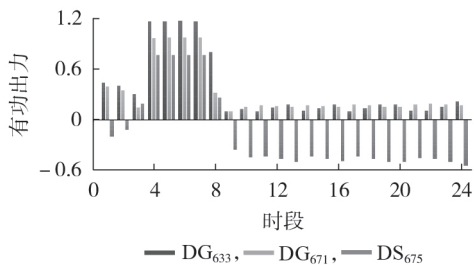


图3 子区2配电系统各时段的电源有功出力情况

Fig.3 Active power output of distributed sources in distribution system of Sub-area 2 in each period

从恢复结果可以看出:为保证在决策时段4—7向上为输电网传输2.3 MW功率以及为更重要的负荷更长时间地供电,储能系统在决策时段1、2处于充电状态,在决策时段3—8进行放电,与其他分布式电源共同向上为输电网供电;从决策时段9起,

由于输电网已恢复向配电网供电,储能系统开始充电。在输电网恢复供电之前(即决策时段9开始前),分布式发电机 DG_{633} 、 DG_{671} 的最终剩余能量分别为1845.3、1573.8 kW·h,储能系统 DS_{675} 的剩余能量为231.2 kW·h。

3.2.2 不含分布式电源的子区1恢复

由输电网中的黑启动电源 G_1 提供能量,并逐步进行恢复,该区输电系统节点恢复次序为节点1、5、6、11、2、12、3、13、14。此时,发电机组 G_1 、 G_2 、 G_6 已经完成启动,并向系统提供能量, G_3 仍处在启动过程中。发电机输出电能为11251 MW·min。其中,在决策时段4,输电网通过节点11向配电网提供能量。

3.2.3 系统整体恢复效果

由2个子区的恢复结果可知,本文所提方法所得输电系统发电机输出总能量为15817.5 MW·min。各个子区的发电机组输出的总有功功率变化曲线如图4所示。

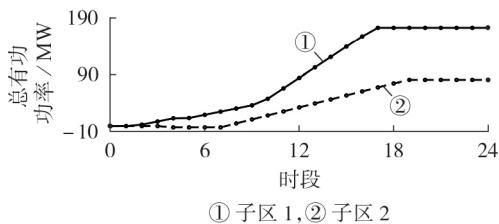


图4 输配电系统协同恢复时各分区各时段发电机组总有功功率输出情况

Fig.4 Total active power output of generators in sub-areas with coordinated restoration of transmission and distribution systems in each period

3.3 对比分析

为验证本文所提方法的优势,本文将其与不考虑输配电系统协同的传统恢复方法进行对比。传统恢复策略通常仅考虑“自上而下”或者“自下而上”的单一恢复方式。在本算例中,输电系统电源容量远大于配电系统接入的分布式电源容量,因此其恢复方法为利用输电系统的电源实施“自上而下”的恢复方式,而分布式电源在配电系统失电、输电系统恢复阶段不向输电系统送电,仅用于恢复本地重要负荷。由于输电系统中仅有1个黑启动电源,因此传统恢复方法应用在本算例中时,只能进行不分区的次序恢复,节点恢复次序为节点1、5、6、11、10、2、4、7、8、3、9、13、14、12。在决策时段24结束时,所有发电机组已经完成启动,并向系统提供能量。此时,发电机的输出总能量为13880.5 MW·min。相比于传统的恢复方法,输配电系统协同恢复方法可在更短的时间内恢复全部负荷。

图5、6分别展示了本文所提的输配电协同恢复方法与传统恢复方法实施过程中,发电机组输出的总有功功率和总能量对比。

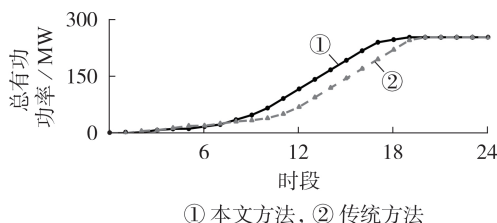


图5 本文方法和传统方法下各时段发电机组输出的总有功功率对比

Fig.5 Comparison of total active power output of generators in each period between proposed and traditional restoration methods

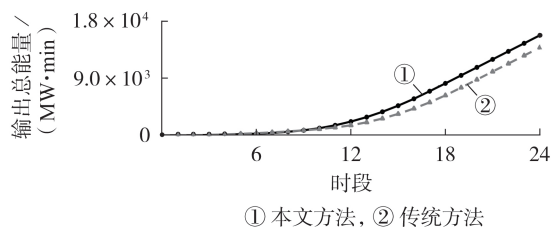


图6 本文方法和传统方法下各时段发电机组的输出总能量对比

Fig.6 Comparison of total energy output of generators in each period between proposed and traditional methods

由图5可见,在决策时段1—7,无协同的传统恢复方法下的输电系统总有功功率大于本文所提恢复方法下的输电系统总有功功率,这是因为在这些时段子区2的发电机在吸收配电系统分布式电源的功率进行启动,而在决策时段8,发电机完成启动后,其总有功功率很快超过传统恢复方法下的总有功功率,且率先恢复所有负荷。

由图6可见,在决策时段10之前,2个方案的总输出恢复能量大致相等,从决策时段10开始,本文所提恢复方法得到的输出总能量明显大于不考虑的输配电系统协同的传统恢复方法得到的输出总能量。最终,本文所提恢复方法得到的输出总能量比传统恢复方法多13.94%。主要原因在于,由本文所提恢复方法,在子区2内,含分布式电源的配电网作为黑启动电源,在决策时段4—7内通过配电馈线向输电网提供2.3 MW的黑启动功率,从而加速了输电网中机组 G_8 的启动。而 G_8 快速启动后,将进一步增加子区2的恢复能量输出,从而达到加速恢复的目的。

4 结论

本文针对大停电后的系统恢复问题,提出了计及分布式电源的输配电系统协同恢复优化决策方法。该方法根据输电系统和配电系统的不同恢复目标和约束条件,建立了输配电系统协同恢复双层优化模型,并考虑了分布式电源对系统恢复的支撑作

用,通过决策配电馈线的传输功率,实现输配电系统恢复的多时段协同。与输配电系统无协同的“自上而下”恢复方式相比,本文所提计及分布式电源的输配电系统协同恢复方法能够实现大型发电机组出力和高密度分布式能源的时空同步,实现黑启动资源的优化调度,加速系统的整体恢复。

系统恢复子区的划分是并行恢复的前提与基础,不同的恢复方案可能对考虑分布式电源支撑作用的输配电协同恢复策略产生影响。在下一步研究中,将重点解决考虑分布式电源支撑的快速分区与并行恢复联合优化决策方法。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] JIANG Yazhou, CHEN Sijie, LIU C C, et al. Blackstart capability planning for power system restoration[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2017, 86: 127-137.
- [2] 顾雪平, 李新军, 杨超, 等. 考虑风电参与的黑启动方案[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 31-37.
GU Xueping, LI Xinjun, YANG Chao, et al. Black start scheme considering wind power participation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 31-37.
- [3] ADIBI M, CLELLAND P, FINK L, et al. Power system restoration: a task force report[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1987, 2(2): 271-277.
- [4] 刘玉田, 王洪涛, 叶华. 电力系统恢复理论与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 3-7.
- [5] LIU Weijia, LIN Zhenzhi, WEN Fushuan, et al. Sectionalizing strategies for minimizing outage durations of critical loads in parallel power system restoration with bi-level programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2015, 71: 327-334.
- [6] 周光奇, 顾雪平, 马世英, 等. 基于整数线性规划的恢复子系统划分与分区方案的综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 91-98.
ZHOU Guangqi, GU Xueping, MA Shiyong, et al. Restoration subsystem division based on integer linear programming and comprehensive evaluation of dividing schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 91-98.
- [7] 顾雪平, 王大江, 李少岩, 等. 电力系统扩展黑启动方案的后效性研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(8): 238-246.
GU Xueping, WANG Dajiang, LI Shaoyan, et al. Investigation on aftereffect of power system extended black-start scheme[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(8): 238-246.
- [8] LIU Weijia, SUN Lei, LIN Zhenzhi, et al. Multi-objective restoration optimisation of power systems with battery energy storage systems[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(7): 1749-1757.
- [9] SUN Runjia, LIU Yutian, WANG Liang. An online generator start-up algorithm for transmission system self-healing based on MCTS and sparse autoencoder[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2061-2070.
- [10] WANG Ying, XU Yin, HE Jinghan, et al. Coordinating multiple sources for service restoration to enhance resilience of distribution systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5781-5793.
- [11] LI Yong, XIAO Juanxia, CHEN Chun, et al. Service restoration

- model with mixed-integer second-order cone programming for distribution network with distributed generations[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4138-4150.
- [12] 许寅, 和敬涵, 王颖, 等. 韧性背景下的配网故障恢复研究综述及展望[J]. 电工技术学报, 2019, 34(16): 3416-3429.
XU Yin, HE Jinghan, WANG Ying, et al. A review on distribution system restoration for resilience enhancement[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(16): 3416-3429.
- [13] 许寅, 王颖, 和敬涵, 等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 123-131.
XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 123-131.
- [14] ZHAO Jin, WANG Hongtao, LIU Yutian, et al. Coordinated restoration of transmission and distribution system using decentralized scheme[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(5): 3428-3442.
- [15] NEJAD R R, SUN Wei, GOLSHANI A. Distributed restoration for integrated transmission and distribution systems with DERs[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4964-4973.
- [16] NEJAD R, GOLSHANI A, SUN Wei. Integrated transmission and distribution systems restoration with distributed generation scheduling[C]//2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting(PESGM). Portland, OR, USA: IEEE, 2018: 1-5.
- [17] 周光奇, 顾雪平, 马世英, 等. 基于整数线性规划的恢复子系统划分与分区方案的综合评价[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1): 91-98.
ZHOU Guangqi, GU Xueping, MA Shiyang, et al. Restoration subsystem division based on integer linear programming and comprehensive evaluation of dividing schemes[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1): 91-98.
- [18] SCHNEIDER K, TUFFNER F, ELIZONDO M, et al. Evaluating the feasibility to use microgrids as a resiliency resource[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 687-696.
- [19] 孙磊, 张臻, 林振智, 等. 大停电后电力系统黑启动分区两步策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(9): 14-21.
SUN Lei, ZHANG Can, LIN Zhenzhi, et al. Two-step strategy for black-start zone partitioning of power system after blackout[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(9): 14-21.
- [20] LI Changcheng, HE Jinghan, ZHANG Pei, et al. A novel sectionalizing method for power system parallel restoration based on minimum spanning tree[J]. Energies, 2017, 10(7): 948.
- [21] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 重要电力用户供电电源及自备应急电源配置技术规范: GB/T 29328—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

作者简介:



李长城

李长城(1989—), 男, 广西博白人, 助理教授, 博士, 主要研究方向为电力系统/交直流混联系统恢复(E-mail: lichangcheng@gxu.edu.cn);

和敬涵(1964—), 女, 河北保定人, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、电力系统自愈恢复、主动配电网等(E-mail: jhhe@bjtu.edu.cn);

王颖(1992—), 女, 河北保定人, 博士后, 博士, 通信作者, 主要研究方向为韧性电网、配电网故障恢复、电力交通融合等(E-mail: yingwang1992@bjtu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

Coordinated restoration of transmission and distribution systems considering DG support

LI Changcheng¹, HE Jinghan², WANG Ying², MA Jiajun², ZHU Shiyan², XU Yin², LIU Jiayu³

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China;

2. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

Abstract: With a considerable amount of DGs(Distributed Generations) integrating into distribution system, the power can transmit upward from distribution system to transmission system. Firstly, based on the promotion of high-density DGs to the regional parallel recovery of power system, the basic conditions for the regional recovery of large-scale power system with DGs are analyzed. Then considering related operational constraints, a bi-level MILP(Mixed-Integer Linear Programming) model for the coordinated restoration of transmission and distribution systems is proposed for large-scale power grids with high-density DGs. The upper transmission system restoration model aims to maximize the output energy and load recovery, while the lower distribution system restoration model aims to maximize the recovery number of weighted critical load. Then a two-layer MILP model decoupling solution strategy is proposed, which considers the cooperation between dispatching centers of the transmission and distribution networks. The decoupled models can be solved by commercial optimization software respectively in transmission and distribution dispatching centers, thus the coordination of transmission and distribution system restoration with high-density DGs is realized, and the restoration effect is improved. Finally, an example of transmission and distribution systems is constructed by using the improved IEEE 14-bus transmission test system and IEEE 13-bus distribution test system, and the effectiveness of the proposed method is verified by simulation.

Key words: electric power systems; coordinated restoration; transmission and distribution systems; distributed generation; resilience

附录 A

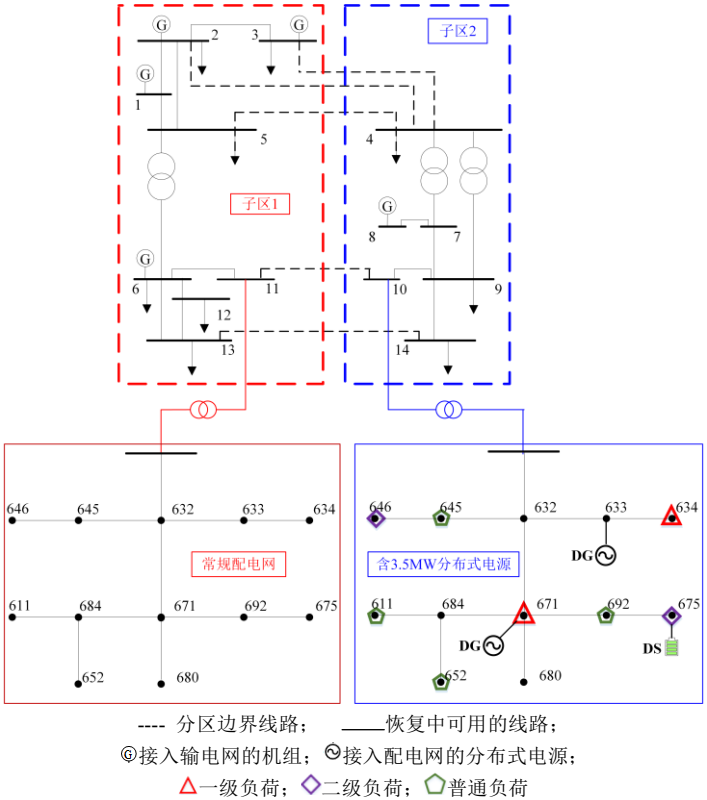


图 A1 IEEE 14 节点输电-IEEE 13 节点配电系统

Fig.A1 IEEE 14-bus system incorporated with 2 IEEE 13-bus systems