

旋转备用对电网可靠性的影响及优化配置研究

赵渊¹, 何媛¹, 芦晶晶²

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆 400044;

2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 旋转备用 (Spinning Reserve, SR) 的不同分配方案会导致不同的电网可靠性水平。从改善大电网运行可靠性的角度出发, 综合考虑机组类型和爬坡速率、元件可靠性参数、网络拓扑结构以及传输容量限制等因素, 将 SR 的优化分配纳入到最优负荷削减模型中。利用该模型不等式约束中控制参数的拉格朗日乘子的物理意义, 推导出系统电力不足期望对各机组备用容量的灵敏度表达式, 提出了根据该灵敏度结果进行备用优化配置的启发式思路。同时以 SR 成本与用户停电损失之和最小为目标, 通过同步联合优化确定 SR 的总量与配置方案。RBTS 测试系统的仿真结果表明了所提方法的有效性和正确性。

关键词: 旋转备用; 可靠性; 灵敏度; 优化配置

Allocation optimization of spinning reserve and its effect on bulk power systems reliability

ZHAO Yuan¹, HE Yuan¹, LU Jing-jing²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University),

Chongqing 400044, China; 2. College of Information and Electrical Engineering,

China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: The reliability of power system varies with the allocation scheme of spinning reserve (SR). To improve the operational reliability of bulk power systems, the operational constraints of SR are embedded into the conventional optimal load shedding model incorporating unit types, ramp rates, component reliability parameters, network typology configuration and transmission capacity limits. Moreover, a sensitivity formula of the expected demand not supplied (EDNS) with respect to the capacity of SR is deduced based on the actual physical meanings of Lagrange multipliers in the inequality constraints. Therefore utilizing the ranking of the sensitivity indices, a heuristic idea is proposed to determine the optimal allocation of SR. Simultaneously, the optimal capacity and allocation scheme of SR are identified to minimize the total cost (the sum of SR cost and customer interruption cost) by joint optimization. Finally, the RBTS power systems are evaluated and the simulation results verify its validity.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50977094).

Key words: spinning reserve (SR); reliability; sensitivity; optimal allocation

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)08-0040-07

0 引言

现代电力系统的规模、结构日趋庞大和复杂, 各种不确定因素对电网的影响日渐明显^[1]。电力系统中发输电设备的随机故障无法避免, 为确保用户的供电可靠性, 需留有一定的发电备用容量。一般

而言, 备用容量越大, 系统可靠性越高^[2]。然而, 在配置旋转备用 (SR) 时, 不仅要考虑其对电网可靠性的改善而创造的可靠性效益, 还需计及配置备用带来的运行成本。因此, SR 并非越多越好, 且在总备用容量给定时, 其在机组中的不同分配方案会导致不同的电网可靠性能。

文献[3]讨论了机组故障、负荷波动及输电元件故障对备用分配的影响, 从各机组对系统运行风险影响的角度研究了如何在机组间分配备用责任, 但忽略了机组爬坡速率和输电容量限制。文献[4]提出一种基于隐性备用约束的机组组合模型, 将 SR 约

基金项目: 国家自然科学基金 (50977094); 重庆市自然科学基金 (CSTC, 2011BB6047); 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目 (2007 DA10512711208); 中央高校基本科研业务费科研专项 (CDJZR11150012)

束隐含在目标函数中, 采用遗传算法进行求解。文献[5-7]通过成本效益分析来确定最优备用容量, 却没有考虑网络拓扑结构对备用分配的约束作用。文献[8-9]利用机组出力变化对输电线路功率流的影响因子来考虑线路容量对 SR 与电网可靠性的约束。文献[10-11]研究表明系统的运行可靠性不仅与电网可靠性参数有关, 还受到 SR 分配方式的影响, 并基于系统所期望的经济性与可靠性目标来确定配置方案。

本文基于发输电组合系统, 考虑机组和线路随机故障, 同时计入机组爬坡速率、网络拓扑结构等因素, 利用最优负荷削减模型中拉格朗日乘子的物理意义, 提出了基于灵敏度分析的发电机组旋转备用启发式优化配置方法。在最优备用容量的确定上, 兼顾电网可靠性与经济性, 以 SR 成本与用户停电损失之和最小为优化目标, 提出了 SR 的分配与容量确定同步联合优化的方法^[12-13]。本文也比较了不同备用配置方案、不同备用总量、以及不同线路容量、机组爬坡速率等对系统运行可靠性与经济性的影响, 验证了本文方法的正确性。

1 计及 SR 的最优负荷削减模型

为兼顾计算精度和计算时间, 本文采取基于直流潮流的最优负荷削减模型, 具体如下。

1) 目标函数

$$\min C_s = \sum_{j \in NB} C_j \quad (1)$$

式中: C_s 为系统状态为 s 时的负荷削减量; C_j 为节点 j 的有功负荷削减量; NB 为系统节点集合。

2) 约束条件

$$\mathbf{T}(s) = \mathbf{A}(s)(\mathbf{PG} - \mathbf{PD} + \mathbf{C}) \quad (2)$$

$$\sum_{j \in NB} PG_j + \sum_{j \in NB} C_j = \sum_{j \in NB} PD_j \quad (3)$$

$$PG_j = \sum_{i \in j} P_i \quad (4)$$

$$|T_k(s)| \leq T_k^{\max} \quad (5)$$

$$0 \leq C_j \leq PD_j \quad (6)$$

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (7)$$

对各机组配置 SR, 既要考虑机组的额定容量与当前出力, 还需计及不同机组的爬坡速率约束。

$$0 \leq R_i \leq \min(P_i^{\max} - P_i^0, 10r_i) \quad (8)$$

$$P_i \leq R_i + P_i^0 \quad (9)$$

$$j \in NB, i \in NG, k \in NL$$

式(2)~式(9)中: $\mathbf{T}(s)$ 为系统状态 s 的有功潮流矢量; $\mathbf{A}(s)$ 为系统状态 s 的有功潮流和注入功率间的关系矩阵; \mathbf{PG} 、 \mathbf{PD} 和 \mathbf{C} 分别是发电输出、负荷功率

和负荷削减矢量; PG_j 、 PD_j 、 C_j 和 $T_k(s)$ 分别是 \mathbf{PG} 、 \mathbf{PD} 、 \mathbf{C} 和 $\mathbf{T}(s)$ 的元素; T_k^{\max} 则为线路 k 的额定容量; P_i^{\min} 和 P_i^{\max} 分别为机组 i 的最小与最大有功输出; r_i 为机组 i 的爬坡速率, $10r_i$ 为 10 min 机组可增发的功率; P_i 和 R_i 分别为发电机组 i 的实际有功出力 and 旋转备用; P_i^0 为发电机组 i 的初始有功输出; NG 和 NL 分别为系统发电机和输电线路集合。

其中, 式(2)为线路有功潮流计算; 式(3)为功率平衡约束; 式(4)为计算节点 j 的有功输出; 式(5)为线路潮流约束; 式(6)为节点削负荷量约束; 式(7)为发电机组 i 的有功出力上下限约束; 式(8)为机组 i 能够配置的 SR 约束; 式(9)为计及 SR 的发电机组 i 出力变化约束。

2 考虑元件可靠性的灵敏度指标计算

假设系统元件的故障率为 λ , 修复率为 μ , 在初始时刻 $t=0$ 元件正常投入使用, 则两状态模型元件在任意时刻 t 的瞬时不可用度为

$$p_{\text{down}} = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} - \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (10)$$

在研究规划阶段, 研究时间 t 一般比较长, 后一项约等于零, 因此元件不可用度即为强迫停运率 (Forced outage rate, FOR): $\lambda / (\lambda + \mu)$ 。

然而在研究运行阶段时, 前导时间 t (即故障元件还不能被替代的这段时间) 一般比较短, 且认为在前导时间 t 内维修过程不能完成, 因此

$$p_{\text{down}} \approx 1 - e^{-\lambda t} \quad (11)$$

从初始时刻 $t=0$ 出发, 当研究时刻为某一时间段 T 到 $T+t$ 时, 元件不可用度为后验故障概率, 与元件前期的情况有关。

1) 元件不能残存到时间 T 的概率为

$$p_T = \int_0^T \lambda e^{-\lambda t} dt = 1 - e^{-\lambda T} \quad (12)$$

2) 元件残存在时间 T , 且在期间 $(T, T+t)$ 内故障的概率为

$$p_t = \int_T^{T+t} \lambda e^{-\lambda t} dt = e^{-\lambda T} - e^{-\lambda(T+t)} \quad (13)$$

因此, 可以得到在期间 $(T, T+t)$ 内元件的不可用度为

$$p_{\text{down}} = p_T + p_t = 1 - e^{-\lambda(T+t)} \quad (14)$$

当 $\lambda(T+t) \ll 1$ 时, $p_{\text{down}} \approx \lambda(T+t)$ 。

得到了系统各元件的不可用度, 便可求出各系统状态下的概率 p_s 。

电力不足期望 (Expected Demand Not Supplied, EDNS): 表示系统在给定时间内因发电容量短缺或

电网约束造成负荷需求电力削减的期望数 (MW)。

$$EDNS = \sum_{s \in S} C_s p_s \quad (15)$$

式中: p_s 表示系统状态为 s 时的概率; S 为系统故障状态的集合。

由式(15)可知, EDNS 指标与第 1 节所介绍模型的目标函数值 C_s 以及反映各元件可靠性参数的状态概率 p_s 有关。

将上节所述最优负荷削减模型简化表述为

$$\begin{aligned} & \min f(x) \quad x \in R^n \\ & \text{s.t.} \begin{cases} g_i(x) \leq 0 & i = 1, 2, \dots, m \\ h_j(x) = 0 & j = 1, 2, \dots, l \end{cases} \end{aligned} \quad (16)$$

在求解上述线性规划模型的最优解过程中, 除可以得到目标函数 $\min f(x)$ 的值以外, 还能得到与各等式和不等式约束相联系的拉格朗日乘子, 它们表示等式和不等式约束的右侧资源变量的微小变化对目标函数 $\min f(x)$ 的边际影响^[14]。例如, 在 SR 优化分配中, 需要得到的是各机组备用量的拉格朗日乘子 $\pi_{R,i}$, 它表示了系统负荷削减量随发电机组 i 的备用容量变化而变化的趋势。

通过计算, 可以得出在系统状态 s 下发电机组 i 备用约束的拉格朗日乘子 $\pi_{R,i}^s$ 为

$$\pi_{R,i}^s = \frac{\partial C_s}{\partial R_i} \quad (17)$$

$\pi_{R,i}^s$ 即表示增加机组 i 的 SR 容量对系统负荷削减量 C_s 的边际改善量。

将元件的故障情况与本文数学模型相结合, 当其他变量约束条件不变时, 可以推导出 EDNS 对各机组备用容量的灵敏度, 它反映了机组备用容量的微小变化对系统电力不足期望值的影响程度, 即

$$\frac{\partial EDNS}{\partial R_i} = \frac{\partial \sum_{s \in S} C_s p_s}{\partial R_i} = \sum_{s \in S} \left(\frac{\partial C_s}{\partial R_i} p_s + C_s \frac{\partial p_s}{\partial R_i} \right)$$

由于概率函数 p_s 与机组备用容量 R_i 之间没有直接的函数关系, 故 $\frac{\partial p_s}{\partial R_i} = 0$, 则

$$\frac{\partial EDNS}{\partial R_i} = \sum_{s \in S} \frac{\partial C_s}{\partial R_i} p_s = \sum_{s \in S} \pi_{R,i}^s p_s \quad (18)$$

式(18)即为 EDNS 对各机组 SR 的灵敏度指标。由此, 也容易推算出研究时段内期望缺供电量对机组备用的灵敏度。

同理, 也可求得 EDNS 对线路容量的灵敏度指标为

$$\frac{\partial EDNS}{\partial T_k} = \sum_{s \in S} \pi_{T,k}^s p_s \quad (19)$$

其中,

$$\pi_{T,k}^s = \frac{\partial C_s}{\partial T_k} \quad (20)$$

某些情况下, 与增加全网的 SR 总量相比, 增强网络结构更有利于提高电网的可靠性。因此, 通过对线路容量灵敏度指标的计算, 可以直观地指出增加哪些线路容量能够显著提升系统的可靠性水平, 从而使输电网络的薄弱环节得以加强。

3 模型求解

3.1 确定系统总备用容量

如何确定一个合理的 SR 总量, 以达到系统可靠性与经济性的最佳协调, 成为本节讨论的重点。

对于机组提供 SR 的单位价格, 不少文献都对此进行了讨论, 本文假设各机组的单位 SR 成本相等, 以 γ 表示。则系统提供备用总量为 R 的成本为

$$M(R) = \gamma R \quad (21)$$

最优备用容量应使系统总成本最小, 即

$$\min C_{ost} = M(R) + N(R) \quad (22)$$

其中 $N(R)$ 代表系统配置容量为 R 的旋转备用时仍需面临的停电损失。

$$N(R) = \alpha EDNS \quad (23)$$

式中, α 为系统单位停电损失费用, 常用 VOLL (Value of Lost Load) 或 IEAR (Interrupted Energy Assessment Rates) 代表。

通过对目标函数式(22)求导, 可得到最优备用容量的必要条件为

$$\Delta M + \alpha \Delta EDNS = \gamma \Delta R + \alpha \Delta EDNS = 0 \quad (24)$$

式中: $\Delta EDNS$ 为增加微量旋转备用 ΔR 后, 系统 EDNS 的微增量, 其为一个负数值。

将迭代终止条件式(24)与 SR 的优化分配相结合, 即可在进行各机组间备用优化配置的同时, 得到系统的最优 SR 总量。

3.2 算法步骤

模型的主要求解流程如下:

- 1) 各机组发电计划与各元件参数已知, 各发电机组的初始旋转备用都设为 0 (初始 $R = 0$);
- 2) 由故障枚举法得到系统故障状态集合, 在各状态下求解最优负荷削减模型, 计算式(17)和式(18)得到各机组备用容量的灵敏度指标 $\frac{\partial EDNS}{\partial R_i}$;

- 3) 排除备用容量 R_i 达到 $\min(P_i^{\max} - P_i^0, 10R_i)$ 的机组, 在剩余发电机组中找到灵敏度绝对值最大 ($\max \left| \frac{\partial EDNS}{\partial R_i} \right|$) 的机组 i , 以某一步长 ΔR (步长越小,

精度越高)增加此机组的备用容量,得到新的旋转备用矢量;

4) 若 $\alpha\Delta EDNS + \gamma\Delta R < 0$, 说明系统购买 ΔR 的备用是有益的, 则转回步骤 2 继续进行迭代计算;

5) 若 $\alpha\Delta EDNS + \gamma\Delta R > 0$, 停止计算, 说明系统不应购买此 ΔR 的备用, 则前一步的 SR 矢量即为各机组 SR 的最优分配值, $\sum_{i \in NG} R_i$ 即为总备用容量 R ;

6) 若 $\alpha\Delta EDNS + \gamma\Delta R = 0$, 停止计算, 此时的备用容量即为各发电机组 SR 的最优分配值, $\sum_{i \in NG} R_i$ 即为系统总旋转备用容量 R 。

4 算例分析

在 RBTS 可靠性测试系统上对本文所提方法进行验证。假设所有系统元件在初始 $t=0$ 时处于正常状态, 一天中高峰负荷出现在 11~12 时段, 参照本文第 2 节所述, 得出元件在这时段内的运行可靠性参数为: $1 - e^{-\lambda(T+t)} = 1 - e^{-12\lambda}$ 。取 $\alpha=1000$ $\$/\text{MW} \cdot \text{h}$, $\gamma=20$ $\$/\text{MW} \cdot \text{h}$, $\Delta R=0.01$ MW 。电网可靠性评估采用故障枚举法, 发电机单独故障考虑至 4 阶, 输电线单独故障及发输电系统组合故障均枚举至 3 阶。

各机组在高峰负荷时的发电计划、爬坡速率及出力约束如表 1 所示。接线图及基础数据参照文献 [15]。表 1 最后一列为当所有机组的初始旋转备用 $R=0$ 时, EDNS 对各机组的备用灵敏度计算结果。

表 1 RBTS 系统各机组参数与 $R=0$ 时灵敏度计算结果

Table 1 Parameters of generator units and sensitivity calculation results for RBTS when $R=0$

机组编号及所在节点	装机容量/MW	发电容量/MW	最小出力/MW	爬坡速率/(MW/min)	$\frac{\partial EDNS}{\partial R_i}$
G1(1)	40	32	10	0.8	0.055 5
G2(1)	40	30	10	0.8	0.055 5
G3(1)	20	16	5	0.5	0.056 9
G4(1)	10	6	3	0.3	0.058 3
G5(2)	40	31	10	2.5	0.059 6
G6(2)	20	17	5	1.25	0.060 5
G7(2)	20	14	5	1.25	0.060 5
G8(2)	20	18	5	1.25	0.060 5
G9(2)	20	14	5	1.25	0.060 5
G10(2)	5	4	1	0.25	0.061 0
G11(2)	5	3	1	0.25	0.061 0

与各机组灵敏度指标相比, EDNS 对各输电线路容量的灵敏度计算结果要小几个数量级, 本文不再将其一一列出。表 1 指出, 当系统无 SR 时, 单位时间内各机组的备用灵敏度指标均较大, 此时只要稍微增加一定量的备用容量, 都会明显改善系统

可靠性。又因线路容量的灵敏度远小于机组备用容量的灵敏度, 说明了 EDNS 指标对机组备用容量的变化较为灵敏, 而对线路容量的微小改变则很不敏感, 这是因为 RBTS 为输电容量较为充裕的系统。

根据灵敏度计算结果, 按照 3.2 节的算法步骤继续进行迭代运算, 可得到 RBTS 系统的备用容量获取与优化配置结果如表 2 所示。

表 2 优化模型的结果

Table 2 Dispatching results of optimal model

机组编号	备用分配值/MW	机组编号	备用分配值/MW
1	0	7	6
2	0	8	2
3	4	9	6
4	3	10	1
5	0	11	2
6	3		

从表 2 可知, 系统总备用容量 $R=27$ MW (占系统总装机容量 11.25%)。表 3 给出了此时电网的各项可靠性指标。其中 PLC (Probability of Load Curtailments) 表示负荷削减的概率。

表 3 最优分配下的可靠性指标

Table 3 Reliability indices of the optimal allocation

节点编号	PLC	EDNS/MW	节点编号	PLC	EDNS/MW
1	0	0	5	0.020 6	0.016 4
2	0.020 6	0.015 6	6	0.021 9	0.043 9
3	0.020 6	0.027 6	系统	0.021 9	0.124 7
4	0.020 6	0.021 2			

为体现系统 SR 的获取与优化配置对大电网可靠性与经济性的提升作用, 表 4 给出了系统无 SR、取 10%峰荷值(18.5 MW)且在各机组中均匀分配、10%峰荷值且在各机组中优化分配、取最大单机容量(40 MW)且优化分配、27 MW 的 SR 均匀分配以及表 2 的优化配置结果(27 MW)下的电网可靠性指标及单位时间的系统成本 (即单位小时成本, $\$/\text{h}$)。

表 4 计算结果对比

Table 4 Comparison of the calculation results

总备用容量 (MW) 及分配方式	系统总成本/ ($\$/\text{h}$)	PLC	EDNS/MW
0	1029	0.051 5	1.029
18.5 均匀分配	727.389	0.025 2	0.357 4
18.5 优化分配	668.606 4	0.022 0	0.298 6
40 优化分配	837.812 4	0.002 0	0.037 8
27 均匀分配	749.864 3	0.021 8	0.209 9
表 2 的优化配置	664.684 5	0.021 9	0.124 7

注: 均匀分配指按各机组可提供的最大旋转备用等比例分配

表 2 和表 3 结果表明, SR 配置不仅与元件可靠性参数有关, 还受机组爬坡速率、网络拓扑结构、机组容量、机组类型等因素综合影响。1) RBTS 系统母线 1 上的机组全为火电机组 (编号 1~4), 母线 2 上均为水电机组 (编号 5~11)。水电机组的调节能力较高, 且本测试系统中水电机组的不可用度比火电机组低, 因此, 即使 G1 和 G2 具有较大的剩余容量, SR 却大都分配于母线 2 上的机组。2) 对于单机容量较大的机组, 其发生故障时对系统可靠性产生的影响较大, 威胁也就越大, 因此增加小容量机组的 SR 将更有效地提高电网可靠性。

表 4 的对比结果说明了本文模型的合理性与有效性。若按传统 10% 峰荷值安排 SR, 将会造成系统备用不足, 可靠性与经济性都较差; 若以最大机组容量作旋转备用, 虽大大提升了电网可靠性, 却需付出更大的备用成本代价, 系统经济性达不到最优。对于同样总量的 SR, 不同配置方式也会导致不一样的系统可靠性与经济性, 表 4 充分验证了这一点, 也说明了本文所提方法的有效性。

为了更好地阐释输电网络约束、机组爬坡速率、机组可靠性参数对 SR 配置的影响, 以表 2 的优化配置结果及其可靠性与经济性指标为基础算例, 从以下几方面进行详细讨论。

Case 1: 将第三条输电线路容量缩小至原来的三分之一。以下从两方面探讨输电线路容量改变给电网可靠性与旋转备用分配带来的影响。

一方面, 仍然按照表 2 的分配方案配置备用, 经计算, 电网可靠性指标变为: $PLC=0.0284$, $EDNS=0.3966$ MW; 每小时的系统总成本增加至 936.5747 \$/h。同时计算单位时间内各机组与线路的灵敏度指标, 通过排序, 得出指标绝对值最大的为输电线路 3, 其灵敏度 $|\partial EDNS / \partial T_3| = 0.0550$ 明显大于其他线路和发电机组, 可见在此备用配置方案下线路 3 成为了电网可靠性的薄弱环节。若不进行输电网络增强, 表 2 的备用分配已变得不合理了。

另一方面, 重新进行优化计算, 表 5 给出了线路 3 容量为基础算例三分之一时的 SR 配置结果。

表 5 线路容量对旋转备用优化配置的影响

Table 5 Impact of line capacity on optimal allocation of SR

机组编号	备用/MW	机组编号	备用/MW
1	1.71	7	1.32
2	3.71	8	0
3	4	9	1.33
4	3	10	1
5	0	11	2
6	0		

系统总备用容量 $R=18.07$ MW (约占系统总装机容量容量的 7.5292%), 可靠性指标为 $PLC=0.0286$,

$EDNS=0.3655$ MW; 总成本为 726.8866 \$/h。显然, 优化配置后的备用总量虽然减少, 但系统经济性和可靠性却有了进一步提升。这也验证了输电网络可能导致电网的增发功率受限, 此时 SR 若配置过多, 将会造成备用浪费, 降低系统经济性。

此外, 与基础算例相比, 可知系统的可靠性指标与经济成本都有了明显增加。也再次验证了线路 3 为输电网络的薄弱环节, 和改变机组的备用容量与配置方案相比, 增强其输电能力更能大大提升电网的可靠性与经济性水平。

Case 2: 鉴于本文中水电机组能在短时间内迅速达到满额出力, 现将 5~11 号机组的爬坡速率缩小十倍 (修改后的水电机组爬坡速率将明显小于火电机组)。重新进行优化计算, 得到最优配置结果如表 6 所示。

表 6 爬坡速率对旋转备用优化配置的影响

Table 6 Impact of ramp rate on optimal allocation of SR

机组编号	备用分配值/MW	机组编号	备用分配值/MW
1	1.61	7	1.25
2	2.64	8	1.25
3	4	9	1.25
4	3	10	0.25
5	2.5	11	0.25
6	1.25		

系统总备用容量 $R=19.25$ MW (约占系统总装机容量容量的 8.0208%), 可靠性指标为 $PLC=0.0285$, $EDNS=0.3324$ MW; 总成本为 717.4248 \$/h。与基础算例相比, 当水电机组的调节能力下降后, SR 的获取与分配会受到爬坡速率的限制 (最优总备用容量以及水电机组所分配到的 SR 均减少), 且部分备用分配值由爬坡速率低的机组 (5~11 号) 向较高爬坡速率机组 (1~4 号) 转移, 系统可靠性降低, 经济成本增加。

Case 3: 将 1~4 号机组的故障率缩小至原来的三分之一。表 7 给出了 SR 的优化配置结果。

表 7 故障率对旋转备用优化配置的影响

Table 7 Impact of failure rate on optimal allocation of SR

机组编号	备用/MW	机组编号	备用/MW
1	0.74	7	0
2	3.26	8	0
3	4	9	0
4	3	10	1
5	0	11	2
6	0		

系统总备用容量 $R=14$ MW (约占系统总装机容量容量的 5.8333%), 可靠性指标为 $PLC=0.0197$, $EDNS=0.2424$ MW; 总成本为 522.3864 \$/h。比较分析可知, 原本母线 1 上的机组可靠性低于母线 2 上的机组, 故障率修改后, SR 的分配大都转移到母

线 1 上, 这说明了机组的可靠性参数对备用配置具有重要作用。且当机组可靠性提升后, 电网对 SR 的需求也会适量减少, 同时大大节省了系统成本。

值得一提的是, 单位停电损失 VOLL 本身为一估计值, 会随着经济发展而不断提高, 且 SR 的价格也不会固定不变。通过计算仿真, 可以看到这样一个趋势: 单位停电损失越大, 配置 SR 越能显著提高系统可靠性并减少停电损失, 因此应当增加备用容量; 而当单位备用成本增加, 则应适当减少备用配置以降低总成本。本文所提优化配置模型则可以实现系统可靠性和经济性的综合协调。

5 结论

本文从改善大电网运行可靠性角度出发, 充分考虑各类不确定因素, 提出了一种在优化旋转备用配置过程中同时确定备用总量的方法, 达成了系统可靠性与经济性的有效协调。在模型求解过程中, 不仅可以得到系统及各节点的可靠性指标与经济成本, 还能从灵敏度计算结果中直观地看出加强哪些元件参数可以有效提升电网可靠性。

随着电力市场改革的进一步推进, 在今后的备用研究中, 可更多地考虑市场机制的作用以及不同电力用户对系统可靠性与经济性的多样性要求, 为建立安全高效的电力备用机制提供技术支撑。

参考文献

- [1] 吴杰康, 李金艳, 黄荣雄. 基于机会约束规划的电力系统安全定价随机模型与算法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(8): 160-166.
WU Jie-kang, LI Jin-yan, HUANG Rong-xiong. A stochastic model and algorithm for security pricing of power systems based on chance constrained programming[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 160-166.
- [2] 丁明, 安玲, 齐先军. 电力市场环境下考虑系统可靠性的备用调度[J]. 继电器, 2007, 35(15): 14-17.
DING Ming, AN Ling, QI Xian-jun. Reserve dispatch considering system reliability in electricity market environment[J]. Relay, 2007, 35(15): 14-17.
- [3] 孟祥星, 韩学山. 不确定性因素引起备用的探讨[J]. 电网技术, 2005, 29(1): 30-34.
MENG Xiang-xing, HAN Xue-shan. Discussion on reserve caused by uncertain factors[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 30-34.
- [4] 张新松, 袁越, 傅质馨. 基于隐性备用约束的机组组合模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 136-142.
ZHANG Xin-song, YUAN Yue, FU Zhi-xin. The unit commitment formulation with implicit reserve constraint[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 136-142.
- [5] WANG Jian-xue, WANG Xi-fan, WU Yang. Operating reserve model in the power market[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 223-229.
- [6] 张放, 刘继春, 高红均, 等. 基于风电不确定性的电力系统备用容量获取[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 14-19.
ZHANG Fang, LIU Ji-chun, GAO Hong-jun, et al. Reserve capacity model based on the uncertainty of wind power in the power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 14-19.
- [7] 李智, 张新松, 郭晓丽. 大规模风电接入火电系统的最优旋转备用容量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 110-114.
LI Zhi, ZHANG Xin-song, GUO Xiao-li. Study on the optimal spinning reserve in thermal power system with significant wind power penetration[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 110-114.
- [8] SU C T, LIN C M, WANG Y F. Economic dispatch and spinning reserve scheduling for generation transmission systems[C] // Electrotechnical Conference, 2004. MELECON 2004, Proceedings of the 12th IEEE Mediterranean, May 12-15, 2004: 865-868.
- [9] JAEFARI-NOKANDI M, MONSEF H. Scheduling of spinning reserve considering customer choice on reliability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2009, 24(4): 1780-1789.
- [10] WANG P, DING Y, GOEL L. Reliability assessment of restructured power systems using optimal load shedding technique[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3(7): 628-640.
- [11] SUN Hong-xing, ZHANG Fu-wei, SONG Ji-ge. The

- calculation of reliability indexes considering the dispatching strategy of spinning reserve[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2010 Asia-Pacific, March 28-31, 2010: 1-5.
- [12] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于多变量广义预测理论的互联电力系统负荷-频率协调控制体系[J]. 电工技术学报, 2012, 27(9): 101-107.
- WU Yun-liang, SUN Yuan-zhang, XU Jian, et al. Coordinated load frequency control system in interconnected power system based on multivariable generalized predictive control theory[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 101-107.
- [13] 朱林, 陈金富, 段献忠. 数字化变电站冗余体系结构的改进及其可靠性和经济性评估[J]. 电工技术学报, 2009, 24(10): 147-151.
- ZHU Lin, CHEN Jin-fu, DUAN Xian-zhong. Improvement of redundant architecture in digital substation and its reliability & economic assessment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(10): 147-151.
- [14] 赵渊, 周念成, 谢开贵, 等. 大电力系统可靠性评估的灵敏度分析[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 25-30.
- ZHAO Yuan, ZHOU Nian-cheng, XIE Kai-gui, et al. Sensitivity analysis on reliability assessment of bulk power system[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 25-30.
- [15] BILLINTON R, KUMAR S, CHOWDHURY N, et al. A reliability test system for educational purposes-basic data[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1989, 4(3): 1238-1244.
-
- 收稿日期: 2013-07-26; 修回日期: 2013-09-11
- 作者简介:
- 赵 渊(1974-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与可靠性; E-mail: yuanzhao@msn.cn
- 何 媛(1989-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与可靠性;
- 芦晶晶(1978-), 女, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统仿真分析计算、可靠性评估及风险分析等方向的研究工作。