

一种考虑可靠性指标的最优潮流模型

丁晓莺^{1,2}, 王锡凡², 王建学²

(1. 西安交通大学电子与信息工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 提出一种考虑可靠性指标的最优潮流模型. 该模型能考虑系统中的随机因素, 通过 z 变换法构造电力系统的可靠性指标约束, 将该约束添加到经典最优潮流(OPF)模型中共同求解, 从而使电力系统的调度或控制能在满足一定的失负荷概率(LOLP)指标的前提下实现最优运行. 所提模型是一个典型的非线性规划模型, 采用内点算法求解. 通过 RTS-24 系统仿真测试以及随机生产模拟程序分析发现, 与经典 OPF 得到的发电计划相比, 考虑可靠性指标后电量不足期望值下降了 31.48%, 而生产成本仅上升了 14.39%. 因此, 所提模型能使系统的调度综合考虑可靠性和经济性, 运行方案更实用.

关键词: 最优潮流; 可靠性; z 变换法; 内点算法

中图分类号: TM744 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-987X(2007)10-1219-05

Optimal Power Flow Model with Reliability Index Constraint

Ding Xiaoying^{1,2}, Wang Xifan², Wang Jianxue²

(1. School of Electronics and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A new optimal power flow (OPF) model with reliability constraint is proposed to obtain an economic and secure operation schedule of the power system, where the reliability index constraint is constructed based on z transform theory to take the uncertainties of electric power system into account, and the objective aims at minimizing the total cost of the system to satisfy the expected loss of load probability (LOLP). The proposed OPF problem with typical nonlinearity is solved by interior point method. Probabilistic production simulation is adopted to evaluate the reliability indices of generation schedules in RTS-24 system simulation. Compared with the operation schedule obtained from the traditional OPF, the expect energy not serve(EENS) decreases 31.48% and the production cost increases 14.39% in the proposed OPF results, verifying the practicability and reliability of the presented OPF formulation.

Keywords: optimal power flow; reliability; z transform method; interior point method

最优潮流(OPF)是最常用的系统运行分析工具. 一般情况下, OPF 模型中的变量和考虑的系统条件都是确定性的, 而实际上电力系统运行中存在很多不确定因素, 如元件的故障以及负荷波动等, 因此调度员的日常决策变得越来越困难.

考虑不确定因素的 OPF 模型分两大类: 概率最优潮流^[1-3]和随机最优潮流^[4-6]. 概率最优潮流只能

得到系统运行状态的统计特性, 对调度人员的实际操作指导意义不大. 随机最优潮流虽能给出具体的调度方案, 但是事故集合的选取对调度结果影响很大. 事故序列过长, 不仅增加模型的规模, 影响算法的计算时间, 更重要的是可能得到过于严格的调度方案, 从而减少系统的经济效益. 如果事故序列过短, 考虑的情况过于乐观, 将降低系统的安全性. 因

此,如果能在 OPF 模型中仅考虑系统中随机变量(包括各种故障情况,负荷波动等)的随机分布特性,而不要求系统运行满足具体的故障环境,将能得到更实用、更可靠的调度方案。

本文提出一种新颖的最优潮流模型,可使电力系统的调度或控制能在满足一定的可靠性指标的前提下实现最优运行。

1 数学模型

电力系统运行过程中存在着大量的不确定因素,在这种情况下,若仍以确定性潮流计算作为规划设计和运行调度人员制定方案的依据则必然不合理。举例来说,传统的 OPF 模型目标是系统发电成本最小,由此在发电计划中,成本越低的机组承担的负荷越多。但是,如果成本低的机组故障率相对较高,一旦该机组发生故障,失负荷所产生的经济损失可能比节约的燃料费用更高。因此,在考虑随机因素(例如发电机组的强迫停运、线路故障等)的情况下,希望系统在达到经济目标的同时保证失负荷的概率低于一定的值,这一条件可表示为

$$\Pr[C \geq D] > p \quad (1)$$

式中: C 表示系统可提供电能的能力; D 表示用户的电能需求; p 表示需要满足的概率指标(一般定为90%以上)。将式(1)加入到传统的 OPF 模型当中^[7],则成为本文提出的 OPF 模型。

2 基于 z 变换法的可靠性建模

2.1 可靠性指标的定义

假设电力系统由 n 个子系统串联构成($i=1, \dots, n$),每一个子系统由数量不等的元件并联构成,如图1所示。每一个元件都拥有其对应的特性,比如容量(c)、故障率(p)以及电气距离(r)等。每一个元件有 m_i 种工作容量,每一种容量有正常和故障两种状态,其对应的容量为 0 和 c_{ij} ($i=1, \dots, n; j=1, \dots, m_i$)。

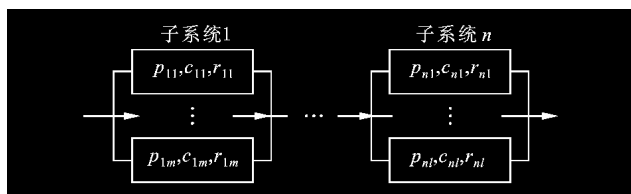


图1 系统结构图

由这些元件工作容量的组合构成系统 M 种工作容量 C_i ($i=1, 2, \dots, M$), $i=1$ 表示最差的工作状态, $i=M$ 反之。对应于每一种状态 i , 如果 $i < j$, 则

$C_i < C_j$ 。因此,在某一时刻,系统可供电能力大于等于负荷 D 的概率定义为

$$\Pr(C \geq D) = \sum_{C_m \geq D} p_m \quad (2)$$

式中: p_m 表示系统处于状态 m 的概率。

2.2 z 变换法

假设 C 为随机变量, C 有 J 种可能的值,其广义矩生成函数(UMGF)可定义为以下多项式的形式

$$u(z) = \sum_{j=1}^J p_j z^{C_j} \quad (3)$$

式中: p_j 表示 $C=C_j$ 的概率。整个系统可供电能力大于等于负荷需求的概率,即式(1)可计算为

$$\Pr(C \geq D) = \Phi(u(z)z^{-D}) = \Phi\left(\left(\sum_{i=1}^m p_i z^{C_i}\right)z^{-D}\right) = \Phi\left(\sum_{i=1}^m p_i z^{C_i-D}\right) = \sum_{i=1}^m \Phi(p_i z^{C_i-D}) \quad (4)$$

其中

$$\Phi(p_i z^{C_i-D}) = \begin{cases} p_i & \text{如果 } C_i \geq D \\ 0 & \text{如果 } C_i < D \end{cases} \quad (5)$$

将式(4)、式(5)代替式(1)构成我们所需要的 OPF 模型。通过并联和串联两种运算子的结合,我们可以计算任意一种串并联系统的 UMGF。

(1)并联运算子 ξ 。简单地假设某一系统由两个元件并联而成,则它的 u 函数为

$$u(z) = \xi(u_1(z), u_2(z)) = \xi\left(\sum_{j=1}^2 p'_j z^{c'_j}, \sum_{k=1}^2 p''_k z^{c''_k}\right) = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 p'_j p''_k z^{c'_j+c''_k} \quad (6)$$

式中: c'_1, c'_2 分别表示元件 1 在故障和正常工作状态下的传输容量; c''_1, c''_2 同理; p'_j 和 p''_k 分别表示元件 1、2 各种状态的概率。因此我们发现 ξ 乘子是各分量的 u 函数简单的相乘,子系统 i 的 UMGF 为

$$u_i(z) = \prod_{j=1}^m u_j(z).$$

(2)串联运算子 δ 。同样假设某一系统由两个元件串联而成,则它的 u 函数为

$$u(z) = \delta(u_1(z), u_2(z)) = \delta\left(\sum_{j=1}^2 p'_j z^{c'_j}, \sum_{k=1}^2 p''_k z^{c''_k}\right) = \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 p'_j p''_k z^{\min(c'_j, c''_k)} \quad (7)$$

顺序地运用 ξ 和 δ 就可以求出一个串并联系统的 UMGF

3 随机因素的处理

3.1 发电机强迫停运

对于发电机而言,它们之间可以看作是并联在

输网络上进行供电的,因此得到发电系统的UMGF

$$u(z) = \prod_{i=1}^{N_g} u_i(z); u_i(z) = p_{gi1} z^{c_{gi1}} + p_{gi2} z^{c_{gi2}} \quad (8)$$

式中: p_{gi1} 表示机组*i*的故障率; $p_{gi2}=(1-p_{gi1})$; $c_{gi1}=0$ 表示机组*i*故障状态下的出力; $c_{gi2}=P_{gi}$ 表示机组*i*正常工作状态下的出力。进一步,我们得到

$$u(z) = \sum_{j=1}^J p_{gj}^g z^{c_{gj}^g} \quad (9)$$

式中: J 为 $p_{gj}(i=1\sim N_g; j=1,2)$ 的排列组合数; p_{gj}^g 表示 p_{gj} 第*j*种排列组合方式的乘积; C_j^g 表示相对应的 $c_{gj}(i=1\sim N_g; j=1,2)$ 第*j*种排列组合方式的和。因此,根据式(4)、式(5)和式(9),得到

$$\Pr(C \geq D) = \sum_{j=1}^J Q_j \quad (10)$$

$$\left. \begin{array}{l} \text{如果 } C_j \geq D, \text{ 则 } Q_j = p_j^g \\ \text{如果 } C_j < D, \text{ 则 } Q_j = 0 \end{array} \right\} j=1, \dots, J \quad (11)$$

将式(11)转化为数学表达形式为

$$\left. \begin{array}{l} (C_j - D)Q_j \geq 0 \\ (C_j - D)(Q_j - p_j^g) \geq 0 \\ 0 \leq Q_j \leq p_j^g \end{array} \right\} j=1, \dots, J \quad (12)$$

将式(10)和式(12)代替式(1),则本文所提OPF问题成为一个考虑发电机强迫停运的OPF问题,且它是一个典型的非线性规划问题,可采用任何非线性规划算法求解,本文采用内点算法求解^[7]。

3.2 考率输电走廊的故障停运

明确所要考核的各输电走廊之间的串并联关系之后,我们就可以通过以下方法估计它们的传输容量和概率。假设一条线路的UMGF为

$$u_i(z) = p_{li1} z^{c_{li1}} + p_{li2} z^{c_{li2}} \quad (13)$$

式中: p_{li1} 表示线路*i*的故障率; $p_{li2}=(1-p_{li1})$; $c_{li1}=0$ 表示线路*i*故障状态下的传输功率; $c_{li2}=P_{li}$ 表示线路*i*在正常工作状态下的传输功率。

如果各输电线路之间的串并联关系复杂,可以先将它们划分为图1所示的子系统结构图,然后按以下步骤计算。

(1)计算最小的子系统的UMGF,如果子系统内各线路之间是串联关系,则子系统的UMGF为

$$u(z) = \sum_{j=1}^J p_j^1 z^{c_j^1} \quad (14)$$

式中: J 为 $p_{lij}(i=1\sim N_1; j=1,2)$ 的排列组合数; p_j^1 表示 p_{lij} 第*j*种排列组合方式的乘积; C_j^1 表示相对应的 $c_{lij}(i=1\sim N_1; j=1,2)$ 第*j*种排列组合方式中各

传输容量最小的值,转化为数学表达形式为

$$0 \leq C_j^1 \leq c_{lij}; \prod_{i=1}^{N_1} C_j^1 - c_{lij} = 0 \quad j=1, \dots, J \quad (15)$$

如果各线路之间是并联关系,则子系统的UMGF仍为式(14)的形式,但是 C_j^1 表示相对应的 $c_{lij}(i=1\sim N_1; j=1,2)$ 第*j*种排列组合方式的和。

(2)将各子系统再根据它们之间的串并联关系,与第1步同样的处理方式得到上一级子系统的UMGF。

(3)重复第2步,直至得到整个输电系统的UMGF。

将得到的输电系统UMGF构造如式(1)的可靠性约束条件,并代入OPF模型中联合求解。

4 算例分析

本文采用RTS-24系统(见图2)对所提模型进行仿真测试,系统各部分参数详见文献[8]。发电机的燃料费用系数(a_1, a_2, a_3)如表1所示,该数据是根据文献提供的数据通过最小二乘法拟合的结果。

表1 机组燃料费用系数

机组类型	燃料费用系数/美元·MW ⁻¹		
	a_0	a_1	a_2
#6oil(12)	33.447	2 069.809	3 603.073
#2oil(20)	653.736	2 188.270	16 314.370
Hydro(50)	0	0	0
Coal(76)	143.540	982.280	368.158
#6oil(100)	299.440	1 725.826	274.179
Coal(155)	215.567	911.702	66.115
#6oil(197)	435.284	1 762.081	114.227
Coal(350)	371.440	909.749	35.110
LWR(400)	240.130	516.887	5.888

4.1 考虑发电机的强迫停运

本节计算仅考虑发电机的强迫停运影响,式(1)中的*p*定为95%。从表2可以发现,如果不考虑发电机强迫停运率的情况下,系统安排机组出力的标准是发电成本最小,因此燃料费用低的机组(例如Hydro(50)、LWR(400)、Coal(350)、Coal(155)等)尽量满出力,剩余的功率才在其他成本高的机组中分配。然而,成本低的发电机,例如LWR(400)、Coal(350)具有较高的强迫停运率,它们满出力就无法满足式(1),因此它们的出力会相应减少,并由强迫停运率低一些的机组(6oil(100)、#6oil(197)等)承担。同时从随机生产模拟程序计算的结果可以看出,由所提模型计算得到的发电计划具有更高的可靠性

(系统电量不足期望值(EENS)由 142.411 MW · h/h 下降至 97.580 MW · h/h). 较高的可靠性是以牺牲一定的经济利益为代价的,从表 2 我们还可以看出,考虑系统可靠性指标之后,发电成本从 3 737 026.52 美元上升到 4 274 741.77 美元。

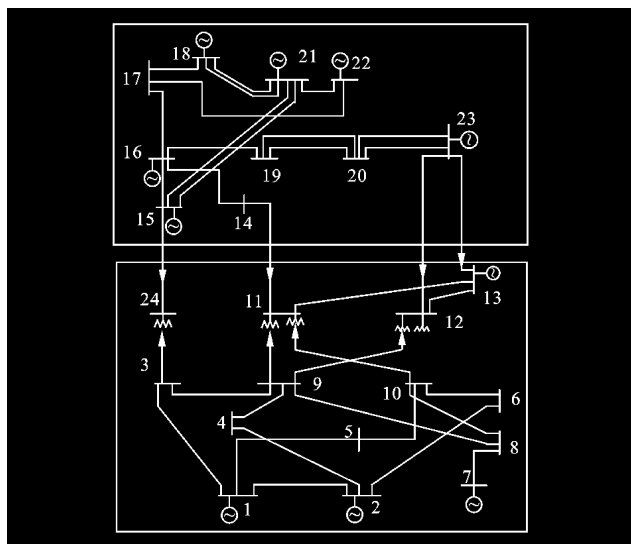


图2 RTS-24 系统图

需要指出的是,由于最优潮流解决的是安排机组发电功率的问题而非机组组合问题,如果系统中已安排启动的发电机都具有较高的故障率,则可能该模型无法找到相匹配的解,此时就只能放弃可靠性指标,仅考虑经济目标。当然,将式(1)的思路加入到机组组合的模型中用于解决发电系统运行充裕度的问题将更有实际意义,这将成为我们下一步的工作内容。

4.2 考虑重要支路的故障停运

本节我们对输电网络可靠性的考核焦点集中在几条重要的输电走廊上,则可靠性标准变为

$$\Pr[C_i \geq D_p] \geq p \quad (16)$$

式中: C_i 表示输电走廊的传输容量; D_p 表示区域之间计划交换的功率。

假设 RTS-24 系统分为两个区域(见图 2),上部区域向下部区域供电任务是 700 MW。我们计算了该情况下的机组调度方案(见表 3)。如果不考虑输电走廊的故障概率,应在保证交换功率任务的前提下尽量安排发电成本小的机组多承担负荷,所以上部分区域成本小的机组(22 节点的 Hydro(50), 23 节点的 Coal(155)以及 18、21 节点的 LWR(400)等)满出力。然而,由于 13 到 23 线路的故障率较高,如果 23 节点机组出力过高就无法满足式(16),因此 23 节点的发电机要将一部分负荷转移给同区域的 15 节点的发电机。可以预料的是,负荷转移给成本较高的机组以保证可靠性指标,从而使系统的发电

成本上升(发电成本由 3 609 788.23 美元上升为 3 739 707.97 美元)。

4.3 概率指标 p 的影响

在所提模型中,可靠性要求的高低可以反映在式(1)的概率指标上, p 越大说明系统失负荷的概率越低,从而系统的可靠性越高。从表 4 结果可以看出, p 分别取 95%、90% 和 80% 时,发电计划发生改变。 p 值越大,强迫停运率高的机组(18 和 21 节点的 LWR(400))承担的负荷越少,相反强迫停运率

表2 调度计划 1 的比较

节点	机组类型	不考虑机组停运的机组出力/MW	考虑机组停运的机组出力/MW
1	#2oil(20)	16	16
1	#2oil(20)	16	16
1	Coal(76)	76	76
1	Coal(76)	76	76
2	#2oil(20)	16	16
2	#2oil(20)	16	16
2	Coal(76)	76	76
2	Coal(76)	76	76
7	#6oil(100)	60.809	98.891
7	#6oil(100)	60.809	98.891
7	#6oil(100)	60.809	98.891
13	#6oil(197)	88.418	169.866
13	#6oil(197)	88.418	169.866
13	#6oil(197)	88.418	169.866
15	#6oil(12)	2.4	5.151
15	#6oil(12)	2.4	5.151
15	#6oil(12)	2.4	5.151
15	#6oil(12)	2.4	5.151
15	#6oil(12)	2.4	5.151
15	Coal(155)	155	155
16	Coal(155)	155	155
18	LWR(400)	400	224.718
21	LWR(400)	400	224.718
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
23	Coal(155)	155	155
23	Coal(155)	155	155
23	Coal(350)	350	312.786

表 3 调度计划 2 的比较

节点	机组类型	不考虑线路停 运的机组出力 /MW	考虑线路停 运的机组出力 /MW
1	# 2oil(20)	16	16
1	# 2oil(20)	16	16
1	Coal(76)	76	76
1	Coal(76)	76	76
2	# 2oil(20)	16	16
2	# 2oil(20)	16	16
2	Coal(76)	76	76
2	Coal(76)	76	76
7	# 6oil(100)	60.954	61.472
7	# 6oil(100)	60.954	61.472
7	# 6oil(100)	60.954	61.472
13	# 6oil(197)	88.418	87.353
13	# 6oil(197)	88.418	87.353
13	# 6oil(197)	88.418	87.353
15	# 6oil(12)	2.4	3.678
15	# 6oil(12)	2.4	3.678
15	# 6oil(12)	2.4	3.678
15	# 6oil(12)	2.4	3.678
15	# 6oil(12)	2.4	3.678
15	Coal(155)	155	155
16	Coal(155)	155	155
18	LWR(400)	400	400
21	LWR(400)	400	400
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
22	Hydro(50)	50	50
23	Coal(155)	155	154.792
23	Coal(155)	155	154.792
23	Coal(350)	349.567	338.595

低的机组(7 节点的 # 6oil(100), 13 节点的 # 6oil(197))承担的负荷越多. 从随机生产模拟程序的计算结果也可以看出系统的可靠性程度越来越低(EENS 从 97.580 MW · h/h 上升到 127.181 MW · h/h,再上升到 142.411 MW · h/h). 同时,系统的发电成本也越来越少(从 4 274 741.77 美元下降到 3 776 448.38 美元,再下降到 3 737 026.52 美元).

虽然文中只讨论了发电机和线路随机特性的影响,但是只要能将系统中的元件串并联关系确定下来,就能够通过所提模型考虑随机特性的影响. 同时,本文算例仅考虑了元件的两种运行状态,即正常

运行和故障停运,其实所提模型能够考虑元件的多种运行状态,比如发电机的降额运行,线路由于气候等情况引起的阻抗波动等. 因此,该模型具有较为广泛的应用.

表 4 不同参数下的调度方案

节点	机组类型	$p=95\%$ 的 机组出力 /MW	$p=90\%$ 的 机组出力 /MW	$p=80\%$ 的 机组出力 /MW
1	# 2oil(20)	16	16	16
1	# 2oil(20)	16	16	16
1	Coal(76)	76	76	76
1	Coal(76)	76	76	76
2	# 2oil(20)	16	16	16
2	# 2oil(20)	16	16	16
2	Coal(76)	76	76	76
2	Coal(76)	76	76	76
7	# 6oil(100)	98.891	66.967	60.809
7	# 6oil(100)	98.891	66.967	60.809
7	# 6oil(100)	98.891	66.967	60.809
13	# 6oil(197)	169.866	96.119	88.418
13	# 6oil(197)	169.866	96.119	88.418
13	# 6oil(197)	169.866	96.119	88.418
15	# 6oil(12)	5.151	2.4	2.4
15	# 6oil(12)	5.151	2.4	2.4
15	# 6oil(12)	5.151	2.4	2.4
15	# 6oil(12)	5.151	2.4	2.4
15	# 6oil(12)	5.151	2.4	2.4
15	Coal(155)	155	155	155
16	Coal(155)	155	155	155
18	LWR(400)	224.718	378.680	400
21	LWR(400)	224.718	375.911	400
22	Hydro(50)	50	50	50
22	Hydro(50)	50	50	50
22	Hydro(50)	50	50	50
22	Hydro(50)	50	50	50
22	Hydro(50)	50	50	50
22	Hydro(50)	50	50	50
23	Coal(155)	155	155	155
23	Coal(155)	155	155	155

5 结 论

本文提出一种考虑可靠性指标的最优潮流模型. 基于 z 变换方法构造电力系统的可靠性指标约束,将该约束添加到 OPF 模型中,从而使电力系统的调度或控制能在满足一定的可靠性指标的前提下实现最优运行. 理论分析表明,所提的 OPF 模型能全面考虑系统中各种元件的多种运行状态的随机特性影响,具有较为广阔的应用空间. RTS-24 系统的

算例分析验证了模型的计算效果。

参考文献:

- [1] Schellenberg A, Rosehart W, Aguado J. Cumulant-based probabilistic optimal power flow(P-OPF) with Gaussian and gamma distributions [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2):773-781.
- [2] Su C L, Lu C N. Two-point estimate method for quantifying transfer capability uncertainty [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2):573-579.
- [3] Method Verbic G, Canizares C A. Probabilistic optimal power flow in electricity markets based on a two-point estimate [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1883-1893.
- [4] Yong Taiyou, Lasseter R H. Stochastic optimal power flow: formulation and solution [C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Seattle, Washington: IEEE, 2000:237-242.
- [5] Monticall A, Pereira M V F, Granville S. Security constrained optimal power flow with post-contingency corrective rescheduling[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(1): 175-182.
- [6] Kimball L M, Clements K A, Davis P W. Stochastic OPF via Bender's method [C]// IEEE Porto Power Tech Conference. Porto, Portugal: IEEE, 2001:217-220.
- [7] 丁晓莺,王锡凡,陈皓勇.一种求解最优潮流的组合算法[J].中国电机工程学报,2002,22(12):11-16.
Ding Xiaoying, Wang Xifan, Chen Haoyong. A combined algorithm for optimal power flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(12):11-16.
- [8] The Reliability Test System Task Force of the Application of Probability Methods Subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98:2047-2054.

(编辑 杜秀杰)