

⑦  
43-48

# 互联电力系统短期可靠性评估 的等效机组法

EQUIVALENT—UNIT METHOD OF SHORT—TERM RELIABILITY  
EVALUATION FOR INTERCONNECTED POWER SYSTEMS

蓝庆华      任 震      冉 立  
Lan Qinghua      Ren Zhen      Ran Li

TM732

(重庆大学电气工程系)

**摘 要** 阐述了短期可靠性评估中等效机组的概念及状态概率的求解方法,并把这一思想和方法应用于互联电力系统短期可靠性评估,建立了等效支援数学模型,且能方便地与子系统模型结合。模型和算法不仅解决了互联电力系统短期可靠性评估中“状态组合爆炸”的难题,而且提高了计算精度。通过算例计算表明:模型和算法是可行和有效的。

**关键词** 互联电力系统; 可靠性; 概率 / 短期

中国图书资料分类法分类号 TM 732

**ABSTRACT** This paper presents the concept of equivalent-unit and the solution method of state probabilities for short-term reliability evaluation for generation systems. The ideas and methods are applied to evaluate short-term reliability of interconnected power systems, and the models of equivalent assistance, which can be conveniently combined with subsystem models, are proposed. The models and algorithm proposed not only solve the difficult problem of "state explosion", but also improve the calculating accuracy. A numerical example is given to show that the models and algorithm are feasible and effective.

**KEY WORDS** interconnected power systems; reliability; probability/short-term

## 0 引 言

通过联络线将各大区电力系统连接成互联电力系统是现代电力系统发展的必然趋势,但由于互联系统的形成而又给系统的运行和调度带来了复杂性。如何合理安排互联子系统间的支援、备用及计划检修等都是必须解决的理论和技术问题。

短期可靠性是电力系统可靠性评估的重要组成部分,在电力系统计划检修安排、运行备用评估和优化、运行可靠性预测及电力系统自适应可靠性控制等方面都起着极为重要的作用。

\* 收文日期 1991-12-13  
国家教委博士点基金资助项目

短期可靠性不仅是时间的相关量,而且要考虑系统运行状态的变化。

对于大型发电系统,如果有  $n$  台机组,即使采用最简单的两状态机组模型,则发电系统的状态亦有  $2^n$  个。随着单机容量的增大,采用多状态的机组模型才是一条可行的途径。但是状态空间图的建立和状态概率的求解将变得十分困难,甚至根本无法实现。这就是所谓的“状态爆炸”难题。文献[1]提出了等效机组的概念及相应的状态概率求解方法,解决了发电系统短期可靠性评估中“状态爆炸”的难题。

本文将文献[1]中等效机组的思想应用到互联电力系统短期可靠性评估,建立了等效支援的数学模型,从而为互联系统短期可靠性评估开辟了另一条新的途径。最后通过算例说明了该模型及相应算法的应用。

## 1 等效机组的概念及状态概率的计算

发电系统的状态数随机组数呈指数关系增长。显然,对于复杂大型电力系统来说,即使对高阶故障状态截尾,要建立全系统状态空间图并寻找出各状态间的转移关系也是极其困难,甚至是不可能的。

在大型电力系统中,将发电机组按类型,容量和可靠性特性相同的的原则进行分类。假设某一类发电机有  $K$  台,若采用机组的两状态模型,则可用一台具有  $K+1$  状态的等效机组表示这一类机组。若采用机组的多状态模型,则仍可用一台多状态等效机组表示,只是状态的组成及关系更为复杂。

对于每一台等效机组,假设其状态之间的转移可用马尔可夫过程(Markov Process)描述,则状态转移密度矩阵  $A$  可表示为:

$$A = \begin{bmatrix} -\sum_{j \neq 1} \lambda_{1j} & \lambda_{12} & \lambda_{13} & \cdots & \lambda_{1k+1} \\ \lambda_{21} & -\sum_{j \neq 2} \lambda_{2j} & \lambda_{23} & \cdots & \lambda_{2k+1} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \lambda_{k+1,1} & \lambda_{k+1,2} & \lambda_{k+1,3} & \cdots & -\sum_{j \neq k+1} \lambda_{k+1,j} \end{bmatrix} \quad (1)$$

则等效机组随时间变化的各状态概率可用式(2)求出:

$$\dot{P}(t) = P(t) \cdot A \quad (2)$$

由于求解式(2)中的微分方程组比较复杂,并且不能方便地考虑各个时间段的状态概率,为此将连续 Markov 过程离散化,用状态转移概率矩阵自乘的方法<sup>[2,3]</sup>来计算各时段状态概率。

若将研究区间划分为  $n$  个时段,设每个时段  $\Delta t$  为离散化步长,则状态转移概率矩阵  $P(\Delta t)$  为:

$$P(\Delta t) = \begin{bmatrix} 1 - \sum_{j \neq 1} \lambda_{1j} \Delta t & \lambda_{12} \Delta t & \cdots & \lambda_{1k+1} \Delta t \\ \lambda_{21} \Delta t & 1 - \sum_{j \neq 2} \lambda_{2j} \Delta t & \cdots & \lambda_{2k+1} \Delta t \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \lambda_{k+1,1} \Delta t & \lambda_{k+1,2} \Delta t & \cdots & 1 - \sum_{j \neq k+1} \lambda_{k+1,j} \Delta t \end{bmatrix} \quad (3)$$

则各时段终点时刻等效机组各状态的概率可由式(4)求出：

$$P(k) = P(0)[P^k(\Delta t)] \quad (k = 1, \dots, n) \quad (4)$$

式中,  $P(0)$  为等效机组初始状态概率矢量。等效机组的各个状态在不同时段的概率为：

$$[P] = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ P_{21} & P_{22} & \dots & P_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m1} & P_{m2} & \dots & P_{mn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $P_{ij}$  为等效机组第  $i$  状态在第  $j$  时段终点时刻的概率。

设系统  $S$  中所有发电机组可以用  $N$  台多状态等效机组模拟, 则各等效机组的状态可以分别用离散型随机变量  $x_1, x_2, \dots, x_N$  表示,  $N$  个离散型随机变量的所有可能取值就构成了一个基本空间  $\Omega$ 。

设随机变量  $x_1, x_2, \dots, x_N$  相互独立, 则对于所有可能的组合  $1 \leq i < j < k \dots \leq N$ , 同时有下式成立：

$$\begin{cases} P(x_i, x_j) = P(x_i)P(x_j) \\ P(x_i, x_j, x_k) = P(x_i)P(x_j)P(x_k) \\ P(x_1, x_2, \dots, x_N) = P(x_1)P(x_2) \dots P(x_N) \end{cases} \quad (6)$$

对于系统  $S$  的各状态, 可以用  $N$  维离散型随机变量  $(x_1, x_2, \dots, x_N)$  表征, 即  $N$  维离散型随机变量在基本空间  $\Omega$  中的一次取值, 就表示系统  $S$  的一个状态。

对于具有  $N$  台等效机组的发电系统, 可以求出  $N$  维离散型随机变量的分布律, 其分布律中的一个元素即对应系统一个状态的概率, 这个状态的容量为  $N$  个随机变量在这次的取值之和。

然而, 在发电系统短期可靠性评估中, 高阶故障状态对系统可靠性指标的贡献很小, 可以忽略不计。为了减小计算工作量, 可以根据式(6)逐步计算系统各状态的概率, 在计算过程中将高阶故障状态截尾。

## 2 等效支援模型

考虑辐射形互联电力系统如图1所示：

研究互联电力系统可靠性的方法有：

LOLP 法；线性网络流法, F & D 法, Monte Carlo 法。就 F & D 法和 LOLP 法中的二维概率数组法及等效支援机组法而言, 有的没有考虑联络线的随机故障特性, 或简单地处理为联络线故障或运行, 这严重影响了方法的严密性和准确性。

对于图1所示的互联系统, 要构成系统 A 对系统 B 的支援模型, 实际上是系统 A 的容量裕度状态与联络线容量状态相结合。对于某个容量裕度状态, 通过联络线后, 构成对 B

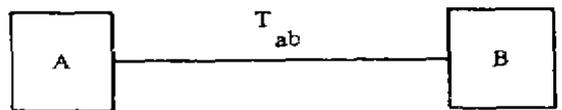


图1 互联电力系统

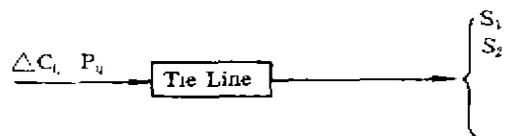


图2 联络线输入输出关系

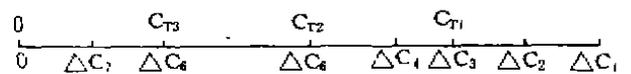


图3 容量裕度及容量状态

系统的支援模型是多个状态, 这是如图2所示的单输入—多输出的关系。

显然,等效支援模型中的状态既不完全是支援系统的容量裕度状态,也不完全是联络线容量状态。支援系统的容量裕度状态对等效支援模型中的各状态都可能具有概率意义上的贡献。

下面用一个简单的例子来说明等效支援模型中状态容量的确定及状态概率的计算。

图3中,  $C_N$  为联络线状态容量;  $\Delta C_i$  为输出系统容量裕度状态,且  $C_{T1} > C_{T2} > C_{T3}$ ,  $\Delta C_1 > \Delta C_2 > \dots > \Delta C_7 > C_T$ 。

设  $C_k$  为等效支援模型中各状态的容量;  $P_k$  为第  $k$  个容量裕度状态的概率;  $R_{kj}$  为第  $j$  步计算时,某些容量裕度状态对等效支援模型中第  $k$  个状态的概率贡献;  $P_n$  为联络线第  $n$  个容量状态的概率。根据图3所示关系,可以确定等效支援模型中各状态的容量,其分别为:

$$\begin{aligned} C_1 &= C_{T1}; & C_2 &= \Delta C_4; & C_3 &= \Delta C_{T2}; & C_4 &= \Delta C_6 \\ C_5 &= \Delta C_{T3}; & C_6 &= 0. \end{aligned}$$

分如下步骤计算支援系统对等效支援模型各状态的概率贡献。

$$\begin{aligned} (1) \quad \Delta C_i \geq C_{T1} \quad (k=1,2,3) & & (2) \quad C_{T2} < \Delta C_4 < C_{T1} \\ R_{11} &= P_{T1} \cdot \sum_{i=1}^3 P_i & R_{12} &= 0.0 \\ R_{21} &= 0.0 & R_{22} &= P_{T1} \cdot P_4 \\ R_{31} &= P_{T2} \cdot \sum_{i=1}^3 P_i & R_{32} &= P_{T2} \cdot P_4 \\ R_{41} &= P_{T3} \cdot \sum_{i=1}^3 P_i & R_{42} &= P_{T3} \cdot P_4 \\ R_{51} &= 0.0 & R_{52} &= 0.0 \\ (3) \quad \Delta C_5 = C_{T2} & & (4) \quad \Delta C_6 = C_{T3} \\ R_{13} &= 0.0 & R_{14} &= 0.0 \\ R_{23} &= 0.0 & R_{24} &= 0.0 \\ R_{33} &= P_5 \cdot \sum_{i=1}^2 P_i & R_{34} &= 0.0 \\ R_{43} &= P_5 \cdot P_{T3} & R_{44} &= P_6 \cdot \sum_{i=1}^3 P_i \\ R_{53} &= 0.0 & R_{54} &= 0.0 \\ (5) \quad C_{T2} < \Delta C_4 < C_{T1} & & & \\ R_{15} &= 0.0 & R_{25} &= 0.0 & R_{35} &= 0.0 & R_{45} &= 0.0 \\ R_{55} &= P_7 \cdot \sum_{i=1}^3 P_i & & & & & & \end{aligned}$$

根据以上计算,等效支援模型中各状态的概率为:

$$R_k = \sum_{j=1}^5 R_{kj} \quad (k=1,2,\dots,5) \quad (7)$$

式中  $R_k$  为等效支援模型中第  $k$  状态的概率。

等效支援模型中的容量状态由如下两个事件的事件构成:联络线 0 容量状态  $A$ ,支援子系统失负荷状态  $B$ ,根据概率理论,事件  $(A+B)$  的概率为:

$$P(A+B) = P(A) + P(B) - P(A) \cdot P(B) \quad (8)$$

### 3 互联系统短期可靠性指标计算

设将研究的时间区间划分为  $n$  个时段, 每个时段为  $\Delta t$ , 对于联络线, 可以得到状态转移概率矩阵  $[P_T(\Delta t)]$  在第  $j$  时段终点时刻联络线各状态的概率为:

$$P_T(j) = P_T(0)[P_T(\Delta t)] \quad (j = 1, \dots, n) \quad (8)$$

式中,  $P_T(0)$  为初始时刻联络线状态概率矢量。

设各子系统负荷相互独立, 且采用实时预测的小时负荷曲线。

根据本文第二部分, 可以分别求出各互联子系统在不考虑相互支援时, 各自的状态概率。然后根据本文第三部分及实时负荷曲线, 分别求出等效支援模型中的状态容量及其概率, 并作为一个等效机组与被支援子系统的状态合并, 求出考虑互联支援后, 各子系统的状态及其概率。设某子系统考虑互联后的容量状态数为  $m$ ;  $P_{ij}$  为该系统第  $i$  状态在第  $j$  时段终点时刻的概率, 其各状态的容量为:

$$[C] = [C_1 \ C_2 \ C_3 \ \dots \ C_m] \quad (10)$$

各时段负荷峰值为:

$$[L] = [L_1 \ L_2 \ L_3 \ \dots \ L_m] \quad (11)$$

状态容量  $C_i$  与各时段负荷峰值之差为容量裕度  $\Delta C_{ij}$ , 即:

$$\Delta C_{ij} = C_i - L_j, \quad (i = 1, \dots, m, j = 1, \dots, n) \quad (12)$$

如果  $\Delta C_{ij} \geq 0$ , 则表明系统在第  $j$  时段内, 状态  $i$  不会失负荷; 反之则失负荷。

如果  $\Delta C_{ij} \geq 0$ , 则令  $B_{ij} = 0$ ; 反之, 则令  $B_{ij} = 1$ , 从而得到失负荷关联矩阵  $[B]$ 。在研究区间内, 该子系统缺电时间期望  $LOLE$  为:

$$LOLE = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot B_{ij} \quad (13)$$

若  $\Delta C_{ij} \geq 0$ , 则令  $\Delta L_{ij} = 1$ , 反之则令  $\Delta L_{ij} = -\Delta C_{ij}$ , 从而得到失负荷量矩阵  $[\Delta L]$ 。在研究区间内, 该子系统缺电能指标  $EENS$  为:

$$EENS = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n P_{ij} \cdot \Delta L_{ij} \cdot T / n \quad (14)$$

式中,  $T$  为研究区间长度;  $n$  为对该研究区间划分的时段数。

### 4 算 例

为了方便比较, 考虑互联子系统 A 和 B 的可用发电机台数及有关参数如表 1 所示, 联络线参数如表 2 所示。

表 1 系统 A 和 B 参数

机组台数	机组容量(MW)	故障率(1/h)	修复率(1/h)
1	200	0.0020	0.0800
8	150	0.015	0.0600
7	100	0.010	0.0400

表 2 联络线参数

联络线回数	每回线容量(MW)	故障率(1/h)	修复率(1/h)
2	100	0.0002	0.0400

表 3 可靠性指标

	可靠性指标	系统 A	系统 B
孤立系统	LOLE	8.634010	6.287642
	EENS	34.911200	31.83430
互联系统	LOLE	0.500321	0.360410
	EENS	5.438901	2.946149

设研究区间为两周即136小时,系统 A 和 B 未互联和互联后,所计算的可靠性指标如表 3 所示。表 3 中,LOLE 的单位为:小时/2周,EENS 的单位为:MW·h。

由表 3 可见,系统互联后可靠性水平得到显著提高,特别是原可靠性水平较低的子系统,互联效益更大。

## 5 结 论

本文引入等效机组的概念,解决了互联电力系统短期可靠性评估中的“状态爆炸”难题,建立的等效支援模型考虑了联络线的随机故障特性。本文方法不仅简化了互联系统短期可靠性评估的复杂程度,而且能方便地采用机组的多状态模型,从而提高了计算精度。

本文思想和方法还可应用于互联电力系统的稳态可靠性评估。

## 参 考 文 献

- 1 蓝庆华,任震,冉立.发电系统短期可靠性评估的等机组法,电力系统及其自动化学报,1992,4(1)
- 2 Billinton R, Allan R N. Reliability Evaluation of Power Systems. New York. U. S. A.: 1984 Plenum Press
- 3 Patton A D. Short-Term Reliability Calculation. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1970, PAS-89(4):509~513
- 4 Billinton R, Chowdhury N A. Operating Reserve Assessment in Interconnected Generating Systems. IEEE Transaction on Power Systems, 1988, 3(4):1479~1287