

퍼지이론을 이용한 유연한 발전기보수유지계획 수립에 관한 연구

김홍식* 문승필 최재석
경상대학교 전기공학과

A Study on the Flexible Generator Maintenance Scheduling using Fuzzy Theory

Hongsik Kim* Seungpil Moon Jaeseok Choi
Gyeongsang National University

Abstract - A new technique using search method based on fuzzy multi-criteria function is proposed for flexible generator maintenance scheduling. Minimization of probabilistic production cost, maximization of system reliability level and air pollution are considered for fuzzy multi-criteria function. To obtain an optimal solution for generator maintenance scheduling under fuzzy environment, fuzzy multi-criteria relaxation method(fuzzy search method) is used. The practicality and effectiveness of the proposed approach are demonstrated by the simulation results of the real size model system of KEPCO-1997 SYSTEM.

1. 서 론

전력사업의 기본적인 운용 및 계획방침은 최적제적인 운용 및 계획비용으로 적절한 공급신뢰도를 유지하면서 요구하는 부하조건에 맞게 전력에너지를 확보하고 공급하고자 하는 것이다. 그러나 부하를 정확하게 예측하기란 불가능하며, 따라서 적절한 공급신뢰도를 항상 확보한다는 것은 쉽지 않다. 특히, 근래 산업시설의 발달로 발전계통의 규모는 거대화되고 구성은 다양화 되었으며 이에 따라 그의 운용 계획도 더욱 복잡하게 되었다[1,2].

이중 발전계통의 발전기보수유지계획에 관한 수립결과와 발전계통 운용계획중 경제성 및 신뢰성 모두에 영향을 미치는 중요한 계획문제이다. 최적보수계획은 공급에 비율을 높여 줄수 있을 뿐만 아니라, 발전기의 건설시기도 연기할 수 있기 때문에 발전기 건설비의 절감효과를 기대할 수 있으며 발전비용 및 보수유지비용의 감소를 가져다준다[3-6]. 본 연구자들은 이에 관하여 관심을 갖고 의사결정자의 주관적 판단을 반영할 수 있는 퍼지이론을 이용하여 경제성 및 확률론적 신뢰도를 고려하여 발전기 보수유지계획수립 수법을 개발한 적이 있다[7-14].

본 연구에서는 이를 더욱 확장하여 화력발전기들에 대한 SO₂와 NO_x의 대기오염도 및 결정론적 신뢰도인 공급예비율을 다각적으로 고려한 유연성을 갖는 발전기보수유지계획수립용 수법을 제안한다. 제안한 수법을 우리나라 1997년도 실제통규모와 가까운 모델계통을 대상으로한 사례연구를 통하여 유용성 및 실용성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 퍼지탐색법

p개의 퍼지 제약(C₁, ..., C_p)과 q개의 퍼지 목표(G₁, ..., G_q)가 있어서 이들의 멤버쉽함수를 각각 μ_{C1}, ..., μ_{Cp} 및 μ_{G1}, ..., μ_{Gq} 라고 할 때 퍼지 결정 집합 D 및 이의 멤버쉽함수를 다음과 같이 정의한다.

$$D = \left(\bigcap_{i=1}^p C_i \right) \cap \left(\bigcap_{j=1}^q G_j \right) \quad (1)$$

$$\mu_D(x) = \min \left[\min_{i=1-p} \mu_{C_i}, \min_{j=1-q} \mu_{G_j} \right] \quad (2)$$

단, min: minimum의 약자임

만족도를 최대로 하는 해를 최적해로 결정하는 만족도 최적화 기준에 의한 최적해를 x*라하면 이는 식 (3)처럼 정의된다.

$$\mu_D(x^*) = \max \mu_D(x) \quad (3)$$

단, max: maximum의 약자임

최적의사결정의 조건식인 식 (3)을 변수로 풀어서 다시 표현하면 식 (4)와 같다.

$$\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \max_{x_1, \dots, x_N} \mu_D(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (4)$$

이것을 퍼지탐색법으로 풀기위해 각 발전기의 최적해를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) &= \max_{x_1, \dots, x_N} \{ \min(\mu_D(x_1), \\ &\mu_{F_2}(x_2), \dots, \mu_{F_{N-1}}(x_{N-1}), \mu_{F_N}(x_N)) \} \\ &= \max_{x_1, \dots, x_N} \{ \min\{\mu_D(x_1^*), \mu_{F_2}(x_2), \dots, \\ &\mu_{F_{N-1}}(x_{N-1}), \mu_{F_N}(x_N)\} \} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 x는 결정변수를 나타내며, F는 퍼지집합G와 퍼지집합 C의 대수합에 의한 퍼지집합이다.

이는 식 (6)과 같이 표현될 수 있으며 여기서 식 (7.a) 및 식 (7.b)와 같은 점화식을 얻을 수 있다. 이를 일반적인 반복법으로 처리하되 이번단계의 상태를 전 단계의 상태와 비교하여서 모든 발전기에서 변화가 없을 경우에 종료토록 한다.

$$\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_N^*) = \max_{x_1, \dots, x_N} [\min\{\mu_D(x_1^*, x_2^*, \dots, x_{n-1}^*), \mu_{F_n}(x_n), \dots, \mu_{F_N}(x_N)\}] \quad (6)$$

$$\mu_D(x_1^*, \dots, x_n^*) = \max_{x_n} [\min\{\mu_D(x_1^*, \dots, x_{n-1}^*), \mu_{F_n}(x_n)\}] \quad (7.a)$$

$$\mu_D(s_n) = \max_{x_n} [\min\{\mu_D(s_{n-1}), \mu_{F_n}(x_n)\}] \quad (7.b)$$

단, s_n = f(s_{n-1}, x_{n-1}) n = 1, 2, ..., N
s: 상태변수
f: 상태전이함수

2.2 퍼지탐색법으로의 정식화

2.2.1 목적함수 [7-11]

(1) 확률론적 발전비용

총 확률론적 발전비용을 최소화하는 목적함수는 식 (8)과 같이 정식화될 수 있다.

$$\text{Minimize } F(E_{in}, \phi_i(U_{in})) \quad (8)$$

$$= \sum_{n=1}^{NT} \sum_{i=1}^{NG} \{A_i E_{in} + B_i T \phi_i(U_{in})\} \quad [\text{won}]$$

단, A_i, B_i : 각각 발전비용함수의 1차계수 및 상수

$$E_{in} = (1 - q_i) T \int_{u_{i-1}}^{u_i} \phi_{in-1}(x) dx \quad [\text{MWh}]$$

E_{in} : n시간대에서 i번째 발전기의 확률론적 발전량

T : 고려대상기간 [hours]

i : 발전기의 투입순위

$$u_i = C_1 + C_2 + \dots + C_i \quad [\text{MW}]$$

$$u_0 = 0$$

ϕ_{in} : n의 i번째 발전기까지 투입될때의 유효부하지속곡선

q_i : i번째 발전기의 사고율

ϕ_{in} : n의 i번째 발전기까지 투입될때의 유효부하지속곡선

q_i : i번째 발전기의 사고율

식 (8)을 퍼지목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (9)와 같다.

$$F(E_{in}, \phi_i(U_{in})) \leq z_{01} \quad [\text{won}] \quad (9)$$

단, Z_{01} : 의사결정자의 발전비용에 대한 지망수준

(2) 공급신뢰도 LOLP의 평가함수

$$\text{Minimize } z_2 = \max(\text{LOLP}_n) = \max\{\phi_{NGn}(U_{NGn})\} \quad [\text{pu}] \quad (10)$$

식 (10)을 퍼지목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (11)과 같다.

$$z_2 \geq z_{02} \quad (11)$$

단, Z_{02} : 의사결정자의 LOLP에 대한 지망수준

(3) 공급신뢰도 EDNS의 평가함수

$$\text{Minimize } z_3 = \max(\text{EDNS}_n) \quad (12)$$

$$= \max\{T \int_{u_{NGn}}^{\infty} \phi_{NGn}(x) dx\} \quad [\text{MWh}]$$

식 (12)를 퍼지 목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (13)과 같다.

$$z_3 \geq z_{03} \quad (13)$$

단, Z_{03} : 의사결정자의 EDNS에 대한 지망수준

(4) 대기오염도 평가함수

$$\text{Minimize } z_4 = \max(\text{AP}_n) \quad (14)$$

$$= \max\{\sum_{i=1}^{NG} \text{TMW}_i(\text{SO}_{2in} + \text{NO}_{Xin})E_{in}\} \quad [\text{ppm}]$$

단, TMW_i : i번째 발전기의 단위 발전전력당 필요한 연료소비량 [Ton/MWh]

SO_{2in} : i번째 발전기의 황산화물의 배출밀도 [ppm/Ton]

NO_{Xin} : i번째 발전기의 질소산화물의 배출밀도 [ppm/Ton]

식 (14)를 퍼지목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (15)와 같다.

$$z_4 \geq z_{04} \quad (15)$$

단, Z_{04} : 의사결정자의 대기오염도에 대한 지망수준

(5) 공급예비를 평가함수

공급예비율의 최대화를 목적함수로 할 경우에는 식 (16)와 같이 정식화된다.

$$\text{Maximize } z_5 = \min(\text{RES}_n) = \min\{(\text{TCAP} - \text{MT}_t - L_{pt})/L_{pt} \times 100\} \quad [\%] \quad (16)$$

식 (16)를 퍼지목표를 나타내는 식으로 표현하면 식 (17.a) 및 (17.b)와 같이 나타낼 수 있다.

$$z_5 \geq z_{05} \quad (17.a)$$

$$z_5 \leq -z_{05} \quad (17.b)$$

단, Z_{05} : 의사결정자의 공급예비율에 대한 지망수준
 $Z_5' = -Z_5$

2.2.2 제약조건

(1) 시종단 경제조건

$$\mathbf{X}(1) = \mathbf{0} \quad \mathbf{X}(T+1) = \text{col}[\text{MD}_1, \text{MD}_2, \text{MD}_3, \dots, \text{MD}_{NG}]^T \quad (18)$$

단, $\mathbf{0}$: 영벡터

MD_i : #i 발전기의 보수기간

(2) 보수가능기간 제약조건

$$U_i(t) = \begin{cases} 0 & t < \text{MS}_i \text{ 또는 } t > \text{MF}_i + \text{MD}_i \text{ 일때} \\ 1 & \text{MS}_i \leq t \leq \text{MF}_i + \text{MD}_i \text{ 일때} \end{cases} \quad (19)$$

단, MS_i : #i 발전기의 최초보수가능 경우중 보수시작 시간대

MF_i : #i 발전기의 최후보수보수가능 경우중 보수 시작 시간대

(3) 동일 발전소내의 보수 발전기의 대수 제약조건

$$\sum_{i \in P_k} U_i(t) \leq 1 \quad (20)$$

단, P_k : #k 발전소의 발전기들의 집합

(4) 보수장비수의 제약조건

$$\sum_{i=1}^{NG} U_i(t) \cdot M_{kli} \leq \text{MA}_k(t) \quad (21)$$

단, k : 보수장비 종류 번호 ($k=1 \dots K$)

l : #i 발전기에 대한 l 번째 보수 시간대 번호 [$= U_i(t) \cdot X_i(t+1)$]

$\text{MA}_k(t)$: t 시간대 동안 사용가능한 k 번째 보수장비량

M_{kli} : #i 발전기가 l 번째 보수 시간대에서 필요로 하는 K 번째 보수장비량

2.3 멤버십함수의 설정

(1) 발전비용 퍼지 집합의 멤버십함수

$$\mu_C\{x(t-1), u(t)\} \quad (22)$$

$$= \begin{cases} 1 & : \Delta C(\cdot) \leq 0 \\ e^{-\eta \cdot \Delta C(x(t-1), u(t))} & : \Delta C(\cdot) > 0 \end{cases}$$

단, $\mu_C(\cdot)$: 발전비용 퍼지 집합의 멤버쉽함수
 $\Delta C(\cdot) = \{F(x(t)) - \text{Casp}(t)\} / \text{Casp}(t)$
 $\text{Casp}(t)$: t시간대에서의 비용지망수준
 W_C : 경제성 멤버쉽함수의 가중치 계수

(2) 공급신뢰도 퍼지집합의 멤버쉽함수

$$\mu_R(x(t-1), u(t)) = \begin{cases} 1 & : \Delta R(\cdot) \leq 0 \\ e^{-W_R \Delta R(x(t-1), u(t))} & : \Delta R(\cdot) > 0 \end{cases} \quad (23)$$

단, $\mu_R(\cdot)$: 공급신뢰도 퍼지 집합의 멤버쉽함수
 $\Delta R(\cdot) = \{\text{RES}(x(t)) - \text{REQ}(t)\} / \text{REQ}(t)$
 $\text{REQ}(t)$: t시간대에서의 공급신뢰도 지망수준
 W_R : 공급신뢰도 멤버쉽함수의 가중치 계수

(3) 대기오염도 퍼지집합의 멤버쉽함수

$$\mu_A(\cdot) = \begin{cases} 1 & : \Delta A(\cdot) \leq 0 \\ e^{-W_A \Delta A(x(t-1), u(t))} & : \Delta A(\cdot) > 0 \end{cases} \quad (24)$$

단, $\mu_A(\cdot)$: 대기오염도 퍼지 집합의 멤버쉽함수
 $\Delta A(\cdot) = \{\text{AP}(x(t)) - \text{ASP}(t)\} / \text{ASP}(t)$
 $\text{ASP}(t)$: t시간대에서의 대기오염도 지망수준
 W_A : 대기오염도 멤버쉽함수의 가중치 계수

(4) 공급예비율 퍼지집합의 멤버쉽함수

$$\mu_S(\cdot) = \begin{cases} 1 & : \Delta S(\cdot) \geq 0 \\ e^{W_S \Delta S(x(t-1), u(t))} & : \Delta S(\cdot) < 0 \end{cases} \quad (25)$$

단, $\mu_S(\cdot)$: 공급예비율 퍼지 집합의 멤버쉽함수
 $\Delta S(\cdot) = \{\text{RS}(x(t)) - \text{RSP}(t)\} / \text{RSP}(t)$
 $\text{RSP}(t)$: t시간대에서의 공급예비율 지망수준
 W_S : 공급예비율 멤버쉽함수의 가중치 계수

2.4 퍼지탐색법에 의한 해석방법

본 연구의 퍼지결정집합 D는 앞서의 식 (1)에 따라 식 (26)과 같이 된다.

$$D = C \cap R1 \cap R2 \cap A \cap S \quad (26)$$

단, C : 발전비용 퍼지집합
R1 : 공급신뢰도 LOLP 퍼지집합
R2 : 공급신뢰도 EDNS 퍼지집합
A : 대기오염도 퍼지집합
S : 공급예비율 퍼지집합

그러므로 앞서의 퍼지탐색법에 적용하면 식 (27)과 같이 된다.

$$\mu_D(x(t)) = \max_{\text{umin}(t) \leq u(t) \leq \text{umax}(t)} \{ \min \{ \mu_C(\cdot), \mu_{R1}(\cdot), \mu_{R2}(\cdot), \mu_A(\cdot), \mu_S(\cdot), \mu_D(x(t-1)) \} \} \quad (27)$$

단, $x(t) = x(t-1) + u(t)$
 $\mu_D(x(0)) = 1.0$
 $\mu_D(\cdot)$: 결정함수 퍼지 집합의 멤버쉽함수

3. 사례연구

3.1 입력자료

본 연구에서 제한하는 방법의 입력자료는 각 주별 첨두부하를 이용하였으며, 1년을 52주로 주간단위 보수계획을 수립하는 것으로 하고 각 주별 부하지속곡선을 이

용하였다. 또한 본 연구에서는 1997년 KEPCO계통과 유사한 모델의 자료를 적용하였으며 발전비용계산은 cumulant법을 이용하였다.

표 1은 본 사례연구에서 사용한 발전비용, 공급신뢰도, 대기오염도 및 공급예비율의 지망수준과 가중치수의 입력자료이다.

표 1 입력자료 (지망수준 및 가중치수)

	지망수준	가중치수
Z ₀₁ (발전비용)	37650 [10 ⁸ 원]	10.0
Z ₀₂ (LOLP)	0.50 [pu/week]	5.0
Z ₀₃ (EDNS)	150000 [MWh/week]	2.0
Z ₀₄ (대기오염)	180000 [10 ⁸ ppm/week]	5.0
Z ₀₅ (공급예비율)	7.5 [%]	2.0

3.2 계산결과 및 검토

그림 1은 반복횟수에 따른 목적함수인 만족도를 의미하는 μ_{max} 값의 수렴모습을 보인 것이며 반복횟수 7번 만에 수렴하였다. 만족도의 값이 약 0.9정도의 값으로 수렴하는 것으로 봐서 이 정도의 만족도는 계획수립에 타당하다고 볼 수 있다.

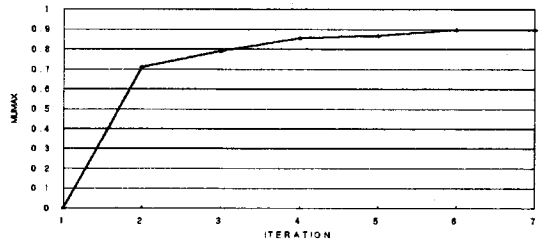


그림 1 반복횟수에 따른 목적함수

한편, 반복횟수에 따른 발전비용 및 공급예비율의 표준편차 변동모습은 그림 2와 같다.

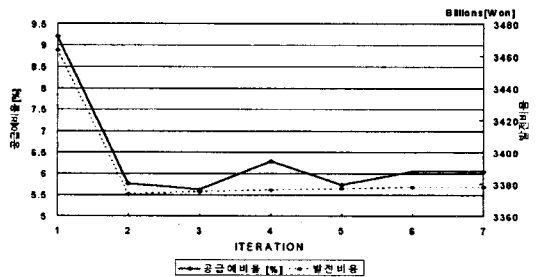


그림 2 반복횟수에 따른 발전비용 및 공급예비율 표준편차 변동모습

그림 3은 주별 보수량을 나타낸 것으로서 보수량은 주로 춘계와 추계에 많은 것으로 나타났으며, 부하량이 많은 하계와 동계에 적은 것으로 나타났다.

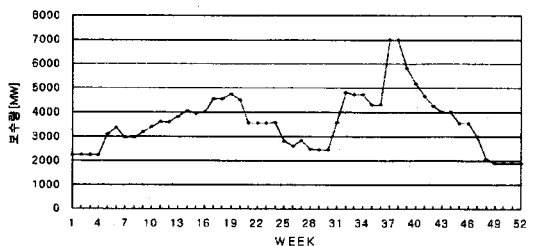


그림 3 주별 보수량

참고로 표 2는 이번예 제안한 방법으로 수립된 발전기 보수유지 계획표이다.

4. 결 론

본 연구에서는 확률론적 발전비용, 확률론적 신뢰도인 LOLP, EDNS 그리고 근래 그 중요성이 높아지고 있는 화력발전기들의 SO₂ 와 NO_x등과 같은 대기오염도 및 결정론적 신뢰도인 공급예비율등을 고려한 발전기보수유지수립 수법을 제안하였다. 제안한 수법을 우리 나라 1997년도 실제통규규모와 가까운 모델계통을 대상으로 한 사례연구를 통하여 유용성 및 실용성을 검증하였다. 사례연구에서 보는 바와 같이 본 수법은 단 하나의 평가함수만을 고려한 기존의 보수계획수립과는 달리 다목적함수를 갖는 수학적 모델에 기초를 두고 보수계획을 수립하므로써 보다 유연한 해를 구할 수 있게 하였다. 특히 퍼지이론을 이용하여 만족도 최대화를 갖는 해를 구함으로써 실제 계통운영자가 유연하게 보수계획을 수립할 수 있도록 도와줄 수 있다고 사료된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 송길영, 전력계통의 해석 및 운용, 동일출판사, pp.11-43, pp344-416, 1984.
- [2] Roy Billinton, Reliability Assessment of Large Electric Power Systems, Kluwer Academic Publishers.
- [3] X. Wang, J.R. McDonald, Modern Power System Planning, McGraw-Hill Book Company, 1994.
- [4] 이 봉용, 심 진보, 한계보수비용 및 위험지수 평균화법에 의한 최적전원보수계획의 비교, 대한전기학회논문지, 1월, Vol.41, No.1, pp.9-17, 1992.
- [5] E.L.Silva, M.Morozowski, etc. Transmission Constrained Maintenance Scheduling of Generating Units: A Stochastic Programming Approach. IEEE Trans. on PS, Vol.10, No.2 pp.695-701, 1995.
- [6] M.K.C. Marwali and S.M. Shahidehpour, Integrated Generation and Transmission Maintenance Scheduling with Network Constraints. IEEE Trans. on PS, Vol.13, No.3 pp.1063-1068, 1998.
- [7] H.J. Zimmermann, Fuzzy Set Theory and Its Applications. Kluwer-Nijhohh Boston, pp.220-234, 1986.
- [8] Masatoshi Sakawa, Fuzzy Sets and Interactive Multiobjective Optimization, Plenum Press, New York, 1993.
- [9] 최 재석, 송 길영, 발전기보수유지계획에 관한 연구, 대한 전기학회 하계학술발표대회 논문집 pp. 148-151, 1985.
- [10] 최 재석, 도 대호, 이 태인, 퍼지 다목적함수를 이용한 발전기보수유지계획의 수립, 한국퍼지 및 지능 시스템학회 추계학술발표대회 논문집 pp.131-138, 1995.
- [11] 최 재석, 부하 불확실성 및 다목적함수를 고려한 발전기 보수유지계획수립에 관한 연구, 기초전력공학 공동연구소 최종보고서, 1995.
- [12] 최 재석, 이 순영, 신 홍교, 퍼지 탐색법을 이용한 발전기 보수유지계획의 수립, 한국퍼지 및 지능 시스템학회 추계학술발표대회 논문집 pp.131-138, 1995.
- [13] 최 재석, 도 대호, 퍼지 정수계획법을 이용한 발전기 보수유지계획수립 수법의 개발, 한국퍼지 및 지능 시스템학회논문집, Vol. 7, No. 5 pp. 77-85, 1997.
- [14] 김 홍식, 문 승필, 도 대호, 최 재석, 이 순영, 신 홍교, 김 상현, 김 용신, 대기 오염을 고려한 發電機 補修維持計劃의 樹立, 대한전기학회 경남지부 추계학술발표 논문집, pp. 57-60, 1998.

표 2 계산결과

NAME	ID0	CAP	NOPT
1	1	1000	1
2	2	1000	1
3	3	1000	1
4	4	1000	1
5	5	1000	1
6	6	1000	1
7	7	1000	1
8	8	1000	1
9	9	1000	1
10	10	1000	1
11	11	1000	1
12	12	1000	1
13	13	1000	1
14	14	1000	1
15	15	1000	1
16	16	1000	1
17	17	1000	1
18	18	1000	1
19	19	1000	1
20	20	1000	1
21	21	1000	1
22	22	1000	1
23	23	1000	1
24	24	1000	1
25	25	1000	1
26	26	1000	1
27	27	1000	1
28	28	1000	1
29	29	1000	1
30	30	1000	1
31	31	1000	1
32	32	1000	1
33	33	1000	1
34	34	1000	1
35	35	1000	1
36	36	1000	1
37	37	1000	1
38	38	1000	1
39	39	1000	1
40	40	1000	1
41	41	1000	1
42	42	1000	1
43	43	1000	1
44	44	1000	1
45	45	1000	1
46	46	1000	1
47	47	1000	1
48	48	1000	1
49	49	1000	1
50	50	1000	1
51	51	1000	1
52	52	1000	1
53	53	1000	1
54	54	1000	1
55	55	1000	1
56	56	1000	1
57	57	1000	1
58	58	1000	1
59	59	1000	1
60	60	1000	1
61	61	1000	1
62	62	1000	1
63	63	1000	1
64	64	1000	1
65	65	1000	1
66	66	1000	1
67	67	1000	1
68	68	1000	1
69	69	1000	1
70	70	1000	1
71	71	1000	1
72	72	1000	1
73	73	1000	1
74	74	1000	1
75	75	1000	1
76	76	1000	1
77	77	1000	1
78	78	1000	1
79	79	1000	1
80	80	1000	1
81	81	1000	1
82	82	1000	1
83	83	1000	1
84	84	1000	1
85	85	1000	1
86	86	1000	1
87	87	1000	1
88	88	1000	1
89	89	1000	1
90	90	1000	1
91	91	1000	1
92	92	1000	1
93	93	1000	1
94	94	1000	1
95	95	1000	1
96	96	1000	1
97	97	1000	1
98	98	1000	1
99	99	1000	1
100	100	1000	1