

# 배전계통 재구성 문제를 위한 Harmony Search 알고리즘 응용

논문
58-9-3

## Harmony Search Algorithm for Network Reconfiguration Problem in Distribution Systems

이 상 봉\* · 김 규 호† · 김 철 환\*\*  
(Sang-Bong Rhee · Kyu-Ho Kim · Chul-Hwan Kim)

**Abstract** - This paper presents a application of new algorithm for feeder reconfiguration problem in distribution systems. Harmony Search (HS) algorithm, which is motivated from the musical performance, is used to reconfigure distribution systems so that active power losses are globally minimized with turning on/off the sectionalizing and the tie-line switches. In optimization processing, the HS algorithm has searching ability for the global optimal solution, simple coding of the iteration procedure, and fast convergence to get the solution. The HS algorithm is tested on 15 buses and 69 buses distribution systems, and the results prove its effectiveness to determine appropriate switching options without the occurrence of any misdetermination in switching and get the minimum power loss.

**Key Words** : Distribution System, Feeder Reconfiguration, Harmony Search Algorithm, Optimization

### 1. 서 론

배전계통은 효과적인 계통의 보호와 운용을 위하여 대부분 방사상(radial)으로 구성되어 있으며 모선구간에서의 개폐기(sectionalizing switch: SS)와 연계선로간의 스위치(tie-switch: TS)를 사용하여 계통을 구성하고 부하에 전력을 공급한다. SS 및 TS의 on-off 상태변화는 부하에 전력을 공급하는 경로 구성을 변화시키게 되며 전체적인 배전계통의 운전상태 변화에 큰 영향을 미치게 된다. 배전계통 운용에 대한 중요 고려사항인 전력손실은 계통을 구성하는 배전선의 저항성분에 의해 대부분 그 값이 결정되기 때문에 중부하(heavy load)에 전력을 공급하는 특정 배전선에서 손실은 더욱 증가하게 된다. 따라서 구간개폐기 및 연계스위치의 조작에 의해서 특정 선로에 집중된 부하를 적은양의 부하만을 담당하고 있는 다른 급전선으로 배전 경로를 변경할 경우 배전계통의 구성변화로 계통운용 시에 발생하는 전체 전력손실을 감소시킬 수 있다. 이와 같이 배전계통 재구성을 통해 특정 배전경로에 편중된 부하를 계통내의 다른 경로를 이용하여 전력을 공급함으로써 전체 배전계통의 전압 프로파일을 향상시킬 수 있으며 그 결과로 계통의 신뢰도를 개선할 수 있다[1-3].

배전계통의 재구성 문제는 계통의 손실최소화를 목적함수로 하고 각각의 개폐기 상태와 모선에서의 전압의 크기 등 여러 가지 제약을 갖는 비선형적이고 조합적인 최적화문제

(nonlinear combinatorial optimization problem)로 표현된다. 재구성 문제를 보다 효율적이고 정확하게 해석하기 위하여 현재까지 진화연산(GA), 신경망등과 같은 인공지능 기법 그리고 기존의 최적화 기법을 사용한 여러 가지 방법들이 제안되고 응용되었다. 그러나 재구성 문제의 복잡성으로 인해 수렴속도 및 최적해의 정확성 보장에는 여러 가지 단점들을 나타내고 있다[4-6].

본 논문에서는 배전계통 재구성 문제를 효과적으로 해석하기 위하여 최적화 알고리즘과 빠른 조류계산을 결합하여 배전 계통에 적용하였다. 최적화 알고리즘으로는 최근에 제안된 HS 알고리즘을 이용하였는데 HS 알고리즘은 최적해의 반복 계산 시 탐색방향과 크기 결정에 있어서 음악의 화음 조율을 모티브로 하여 제안된 알고리즘으로 기존의 GA와 유사한 계산과정을 갖고 있으나 코딩의 단순성과 수렴해의 정확성 그리고 단축된 반복계산으로 인해 효율성이 입증된 최적화 알고리즘이다[7,8]. 또한, 빠른 조류계산을 위하여 각 버스로 유입되는 전류 합을 이용하여 전압의 크기를 계산하는 방법을 사용하였으며, 일반적으로 배전계통은 방사상 구조로 되어 있기 때문에 loop가 존재하는 송전계통보다는 조류계산을 쉽게 처리할 수 있으나 계통 내 스위치 조작에 의한 구성변화에 따른 빠르고 정확한 조류계산을 위해서는 계통의 구성 파악이 가장 중요한 문제로 대두 되므로 본 논문에서는 프로그램의 코딩 및 계통구성 파악에 우수한 장점을 갖고 있는 Ghosh와 Das가 제안한 방법을 사용하였다[9].

### 2. Harmony Search Algorithm

최근에 제안된 HS 알고리즘은 최적의 화음을 위해 악기를 튜닝하는 음악적 모티브를 이용하는 최적화 방법이다. 최적해의 계산 시 현재의 최적해 후보군 중에서 최적의 화음에 가장 근접한 해를 선택하고 이 해를 이용해 탐색 방향,

† 교신저자, 시니어회원 : 한경대학교 전기공학과 조교수 · 공박  
E-mail : kyuhoh@hku.ac.kr

\* 정 회원 : 성균관대 전력IT센터 선임연구원, 공박

\*\* 펠로우회원 : 성균관대 정보통신공학부 교수 · 공박

접수일자 : 2009년 5월 11일

최종완료 : 2009년 7월 13일

크기를 조절함으로써 전역해를 탐색하는 방법이다. HS 알고리즘은 기존의 유전 알고리즘과 비슷한 개념인 competing pool을 이용하는데 유전 알고리즘이 생존에 적합한 세대를 선택하고 나머지는 도태시키는 방법과 같이 HS 알고리즘도 화음에 적합한 해를 선택하여 저장하고 그렇지 않은 해는 화음구성에서 배제하는 방법으로 최적해를 개선해 나간다.

HS 알고리즘에서의 다음 반복계산에서의 해는 우선적으로 기존의 화음을 기반으로 해를 생성하고 악기를 튜닝하는 것과 같이 이를 미세 조정 하여 화음을 검사하게 되는 구성을 갖고 있다. 이러한 비슷한 특징에도 불구하고 HS 알고리즘은 유전알고리즘과 달리 상당히 간단한 계산 과정과 빠른 수렴속도 그리고 정확성 면에서 우수성과 효율성을 갖고 있는 방법이다. HS 알고리즘에서 중요한 요소는 harmony memory (HM) 이며 반복 계산시의 생성해와 개선해는 HM의 정보를 이용한다. 따라서 HS 알고리즘의 계산에는 HM을 개선하는 방법에 중요도를 두고 있으며 알고리즘의 전반적 계산 순서는 다음과 같다[7].

**Step 1. 문제 초기화**

a) 최적화 하고자 하는 문제의 목적함수, 제약함수를 식 (1)과 같이 정식화 한다.

$$\begin{aligned} & \text{Minimize : } f(x), x \in X \\ & \text{subject to } g(x) \geq 0, h(x) = 0, X_{i,\min} \leq X_i \leq X_{i,\max} \end{aligned} \quad (1)$$

b) HM size (HMS), harmony memory considering rate (HMCR), pitch adjusting rate (PAR), 그리고 number of improvisations (NI) 을 결정하고 HM의 decision variable (N)을 식 (1)의  $x$ 로 할당한다. HM은 최적의 변수값을 저장하는 곳으로 반복계산에 따라 개선된 최적해 조합을 갖으며 HMCR과 PAR을 이용해 최적해 그 값이 개선된다.

**Step 2. HM 초기화**

HM 알고리즘의 초기 단계에서는 HM를 구성하는데 랜덤 함수를 이용한다. HM의 크기는 HMS에 의해 결정되고 식 (2)와 같은 구성을 갖는다.

$$HM = \begin{bmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_n^1 & f(x^1) \\ x_1^2 & x_2^2 & \dots & x_n^2 & f(x^2) \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots & \vdots \\ x_1^{HMS} & x_2^{HMS} & \dots & x_n^{HMS} & f(x^{HMS}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

**Step 3. HM 구성**

최초로 구성된 HM을 반복계산 마다 새롭게 구성하고 HM을 이용해 최적해 여부를 판별한다. 이때 HM의 구성에 필요한 변수  $x_i = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  결정에는 랜덤, HMR, PAR을 이용하며 그림 1과 같다.

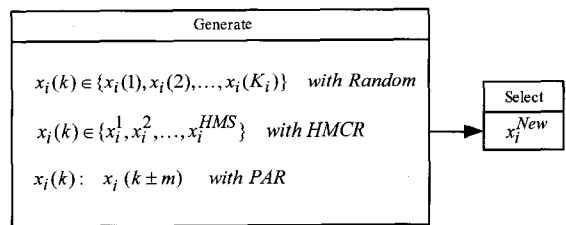


그림 1 HM 개선방법  
Fig. 1 Improvement method for HM

즉, 랜덤값을 생성해서 변수를 생성하거나 이 랜덤값을 이용해 HM에서의 변수 선택을 한다. 이때 미리 정해진 HMCR은 0-1사이의 값을 갖으며 HM에서의 변수 중 어떤 것을 결정할지를 판단하게 된다. 이렇게 생성된 변수에 대해 화음조정을 위한 피치조정 후 새로운 변수로 생성한다.

**Step 4. HM 개선 및 종료**

전 단계에서 새롭게 구성된 변수들을 이용해 목적함수를 계산한다. 이때 화음 조화가 좋을 경우 즉, 최적해의 개선이 있는 경우 HM으로 저장되고 그렇지 않은 경우 전 단계로의 계산을 반복한다. 그리고 최종적으로 미리 정한 반복계산 수 (NI) 나 최적해 개선 여부에 따라 계산을 종료한다.

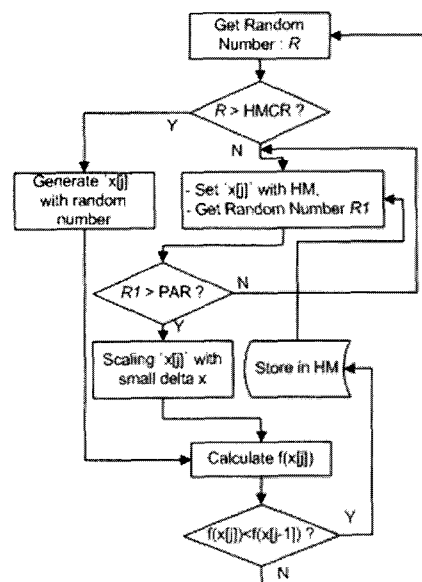


그림 2 HM 알고리즘 순서도  
Fig. 2 Flowchart of HM Algorithm

그림 2는 HM 알고리즘에서 중요한 부분인 HMS를 이용한 변수 생성 방법에 관한 순서도이다.

**3. 재구성 문제의 HS 알고리즘**

**3.1 재구성 문제의 정식화**

배전계통에 있어서 재구성문제는 계통내의 주어진 여러 가지 제약을 만족하면서 손실을 최소화하는 문제이며 수식적으로 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\text{Min } f_c = \sum_{i=1}^{LN} \text{Loss}_i = \sum_{i=1}^{LN} \left[ \frac{r_i (P_i^2 + Q_i^2)}{V_i^2} \right] \quad (3)$$

여기서 LN은 배전계통의 전체 선로수이며  $P_i, Q_i, V_i$ 는 송전단 유효, 무효, 전압 그리고  $r_i$ 선로의 저항성분이다. 이 식에서와 같이 손실은 선로에 흐르는 전류의 제곱에 비례하며 선로의 구성을 바꾸어 전력 조류의 경로를 저항성분이 작은 선로로 변경하는 경우 손실을 저감 시킬 수 있다. 목적함수인 식 (3)은 다음과 같은 제약을 만족해야 한다.

- a) 모든 모선에서의 전압 상, 하한치
- b) 선로 전류의 한계
- c) 모든 부하로의 전력공급
- d) 방사상 구성 유지

### 3.2 HS 알고리즘 적용

본 논문에서는 재구성 문제를 해결하기 위한 계통내 스위치 상태를 결정하고자 HS 알고리즘을 이용하였다. 재구성 문제를 위한 HS 알고리즘의 적용방법은 다음과 같다.

#### 메쉬 네트워크 구성

계통내 연계스위치를 닫을 경우 배전계통은 루프모양을 갖는 메쉬 네트워크로 구성 된다. 그림 3과 같이 15모선을 갖는 계통에서는 2개가 생성됨을 알 수 있다. 즉, 새롭게 생성되는 메쉬 네트워크의 수는 그 계통이 갖고 있는 연계스위치의 수와 같다.

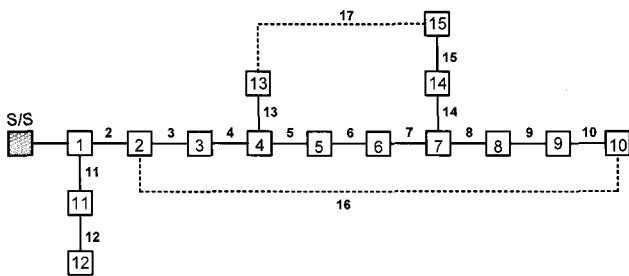


그림 3 15 모선 계통  
Fig. 3 15 Bus System

#### HS 알고리즘 변수 설정

각 메쉬 네트워크에 속해있는 전체 구간개폐기 수를 이용하여 HS 알고리즘의 변수에 관한 상, 하한치를 이용하여 설정 한다. 그림 3에서 #1 네트워크에 속해 있는 구간개폐기는 5, 6, 7, 13, 14, 15, 17번, 총 7개 이므로 HS 알고리즘 변수 상, 하한 값을 1부터 7까지로 결정하고 각 구간개폐기를 변수값으로 할당한다. 이때, 변수는 정수값을 갖으며 예로, HS 알고리즘의 변수값이 1이 될 경우 이 값과 매칭되는 구간개폐기는 5번이 되며 마찬가지로 #2 네트워크에 대한 카오스 변수는 1부터 6까지의 상, 하한 값을 갖는다.

#### HS 알고리즘 적용

- 1) HMS, PAR, NI, HMCR, 파라미터 설정 : HS 알고

리즘의 파라미터를 설정한다. HMS는 GA의 competing pool 과 같이 랜덤변수를 기반으로 해서 얻어진 변수의 하모니를 검사 하는데 사용되며 PAR은 결정된 변수를 조절하는데 사용되는 파라미터이며 본 논문에서의 해석 문제가 재구성에 관한 스위치 상태 결정(0 or 1) 이므로 스텝값을 조절하도록 결정한다. HMCR은 기존의 저장된 HM에서 변수의 선택성을 결정하는데 사용되며 NI는 전체 반복 계산 수를 결정한다.

2) HM 구성 : 계산 초기에 HM을 HMS 수만큼 랜덤으로 구성하고 화음을 평가한다. 재구성 문제에서의 화음은 목적함수인 전체 계통손실이다.

#### 3) 반복계산

a) 변수를 업데이트 : 반복계산에 필요한 변수를 결정하기 위해 랜덤변수를 발생시키고 미리 정한 룰에 따라 HMCR, PAR을 이용해 각각의 변수를 업데이트 한다.

b) 개방 스위치 결정 : 배전계통은 각 메쉬 네트워크에서 중복되지 않도록 오직 하나의 구간 개폐기를 개방 할 경우 새로운 방사상 계통을 구성할 수 있다. 이때, 각 네트워크에서 개방되는 하나의 스위치를 결정하기 위하여 전 단계에서 HS 알고리즘 변수를 개폐기로 할당한다.

c) 계통 재구성 : 조류계산을 위하여 개선된 스위치 조작을 통해 계통을 재구성하고 계통의 방사상 제약을 검사 하고 만족 할 경우 조류계산을 실행하고 그렇지 않으면 a) 를 실행한다.

d) 조류계산 : 새롭게 구성된 계통의 목적함수인 전체 계통 손실 계산을 위한 조류계산을 실행한다. 조류계산후 각 모선에서의 전압제약, 선로 조류한계에 관계된 제약을 만족하지 못하는 경우, 목적함수의 감소가 없는 경우, 그리고 NI 를 만족하지 못하는 경우 a) 를 다시 실행한다.

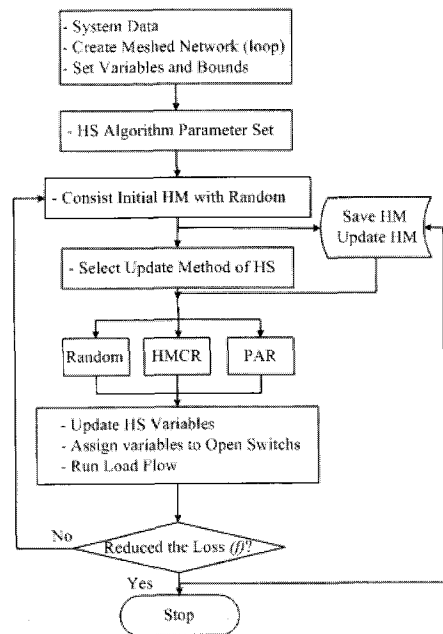


그림 4 재구성문제를 위한 HS 알고리즘  
Fig. 4 HS Algorithm for Reconfiguration

이때, 목적함수의 개선이 있는 경우, 즉 각 변수의 화음이 개선된 경우에는 2)항의 HM에 변수 정보가 저장되며 HM은 반복계산 단계에서 항상 최적의 변수를 저장하게 되고 HMCR을 통해 저장된 정보를 이용해 새로운 변수를 생성하는데 사용된다. 또한, 조류계산은 매번의 반복계산에서 실행되기 때문에 빠른 결과를 보장해야 한다.

이와 같이 HS 알고리즘을 통해 새로운 스위치 조합해를 결정 한 후, 빠르고 정확한 조류계산을 통해 목적함수 즉, 계통손실을 계산하고 이를 이용해 손실을 감소시키는 최적의 계통 재구성을 얻을 수 있다. HS 알고리즘의 재구성 문제 적용에 관한 해법을 정리하여 순서도로 나타내면 그림 4와 같다.

4. 사례 연구

본 논문에서 제안한 방법인 HS 알고리즘의 재구성 문제에 대한 효율성과 신뢰도를 입증하기 위하여 15, 69모선을 갖는 2가지 시험계통에 적용하였는데, 사용된 시험계통은 국부적 최적해가 존재하는 계통이며 사례연구별 내용과 모의 결과는 다음과 같다.

Case 1: 15 모선 계통

Case 1의 계통은 그림 3과 같이 15모선, 2개의 연계선로, 스위치를 갖으며 계통전압은 13.6[kV] 이고 전체부하는 3636[kW], 1550[kVar] 이다. 재구성전의 유효전력 손실은 158.52[kW] 이며 계통의 구성과 데이터는 표 1과 같다[5].

표 1 15 모선 선로 및 부하 데이터  
Table 1 15 Bus Line and Load Data

Br. No.	From-To	P Load[kW]	Q Load[kW]	R[Ω]	X[Ω]
1	0 - 1	56.30	24.00	0.863	1.860
2	1 - 2	115.0	49.00	0.116	0.250
3	2 - 3	138.0	58.80	0.075	1.161
4	3 - 4	0.000	0.000	0.022	0.048
5	4 - 5	390.4	166.3	0.340	0.733
6	5 - 6	214.4	91.40	0.686	0.979
7	6 - 7	137.4	58.60	0.478	0.683
8	7 - 8	560.7	238.9	0.249	0.356
9	8 - 9	229.0	97.60	0.476	0.250
10	9 -10	454.2	193.5	1.401	1.100
11	1 -11	274.5	117.0	0.683	0.975
12	11-12	401.2	171.0	0.446	0.636
13	4 -13	151.5	64.60	1.654	0.535
14	7 -14	190.1	81.00	0.300	0.263
15	14-15	323.7	137.9	0.327	0.286
16*	2 -10	-	-	2.000	1.000
17*	13-15	-	-	1.500	1.000

\* : 연계선로

Case 2: 69 모선 계통

Case 2에서는 69모선을 갖는 그림 5의 시험계통에 적용하였다. 계통 기준전압은 12.66[kV], 계통의 유효, 무효 부하는 각각 1007.908[kW], 897.31[kVar]이고 재구성전의 유효전력 손실은 20.8543[kW]이다. 나머지 계통데이터는 참고문헌 [10]에 나타나 있다.

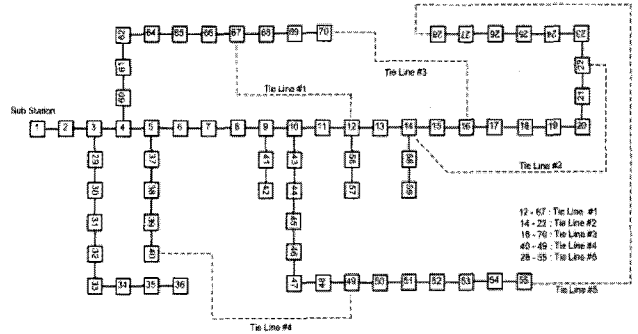


그림 5 69모선 시험계통  
Fig. 5 69 Bus Test System

사례연구 결과, 전력손실은 case 1, 2에서 각각 39.60[kW], 11.72[kW]의 감소와 계통의 최소전압 크기를 사례연구 1에서는 0.915[p.u]에서 0.9441[p.u]로, 사례연구 2에서는 0.9725[p.u]에서 0.9827[p.u]로 향상시키는 스위치 조작 결과를 얻을 수 있었다. 특히, 사례연구에 사용된 계통들은 지역적, 국부적 최소값, 즉 유효전력 손실 118.988[kW], 9.19615[kW]을 얻을 수 있는 스위치 조작이 존재하는데 HS 알고리즘은 전역적 최적해인 118.925[kW], 9.12125[kW]로 정확하게 수렴하는 결과를 나타내었다. 표 2와 그림 6은 case 1인 15모선 재구성 전, 후의 각 모선 전압 결과이며 재구성 후 전압의 표준편차가 감소하여 계통에서의 전압의 프로파일이 전반적으로 상승하였음을 확인 할 수 있으며 그림 7은 69 모선의 결과이다. 69모선에 대한 상세 전압 결과는 appendix에 수록하였으며 15모선 경우와 같이 전압 프로파일 상승에 관한 비슷한 결과를 얻을 수 있었다.

표 2 재구성 전, 후 전압 (Case 1)  
Table 2 Voltage of Pre and Post Configuration (Case 1)

Bus No.	Pre Configuration	Post Configuration
1	0.9641	0.9651
2	0.9603	0.9614
3	0.9579	0.9596
4	0.9572	0.9591
5	0.9476	0.9543
6	0.9338	0.9485
7	0.9252	0.9454
8	0.9223	0.9441
9	0.9200	0.9495
10	0.9150	0.9519
11	0.9599	0.9609
12	0.9583	0.9593
13	0.9556	0.9520
14	0.9240	0.9458
15	0.9231	0.9463
Mean  V	0.94523	0.95645
S.D	0.02302	0.01339

S.D : Standard Deviation

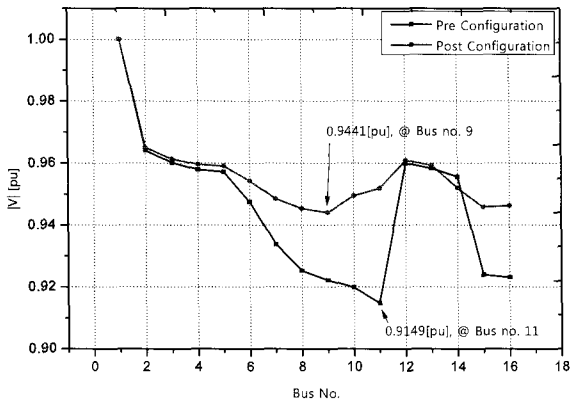


그림 6 전압프로파일 (Case 1)  
Fig. 6 Voltage Profile (Case 1)

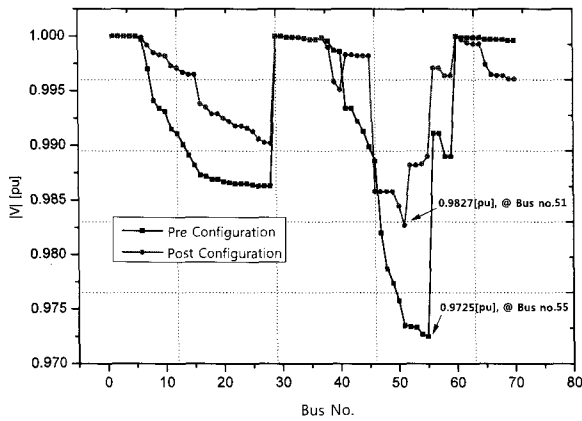


그림 7 전압프로파일 (Case 2)  
Fig. 7 Voltage Profile (Case 2)

그림 8은 재구성을 통한 유효전력 손실변화이며 15모선 계통의 경우에는 4번의 탐색단계, 69모선의 경우에는 7번의 탐색 단계 후 최적 스위치 조합을 나타내어 알고리즘의 빠른 수렴성을 확인 할 수 있었다.

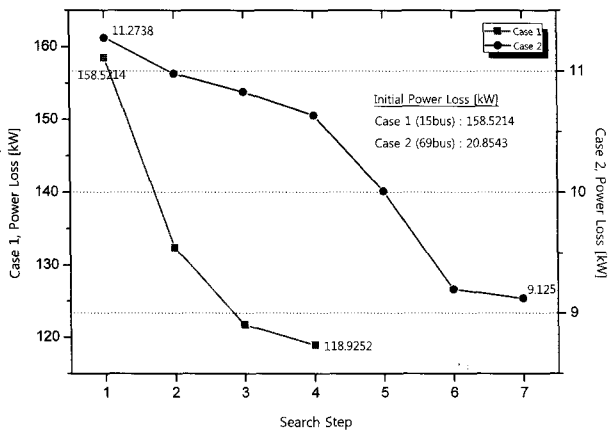


그림 8 유효전력손실 변화 (Case 1, 2)  
Fig. 8 Variation of Active Power Loss (Case 1, 2)

표 3 Case 1, 2의 HS 알고리즘 결과

Table 3 HS Algorithm Results of Case 1, 2

Test Systems	Case 1 (15-bus)	Case 2 (69-bus)
Loss [kW] (Base System)	158.523	20.854
Loss [kW] (optimal)	118.925	9.1213
Solution (optimal) Branch in-out	16-9, 17-14	70-, 71-, 15-72, 45-73, 51-74
Loss [kW] Reduction	39.598	11.733
Min. Voltage [p.u]	0.9441	0.9827
Loss [kW] (Near optimal)	118.988	9.1962
Solution (Near optimal)	16-9, 17-15	70-, 71-, 15-72, 47-73, 52-74

표 3, 4에서는 재구성문제에서의 HS 알고리즘에 의해 손실이 개선되는 탐색단계별 스위치 조합해 결과를 나타냈으며 사례연구 1에서는 4번, 사례연구 2에서는 7번의 탐색단계 후에 최적값으로 수렴하였는데 case 1보다 계통의 모선수가 더 많은 case 2에서 더 많은 수의 계산이 필요함을 알 수 있다. 이러한 결과는 본 연구에서 계통의 방사상 조건을 만족하기만 하면 조류계산을 수행하도록 하였기 때문이며 향후, 내부적 반복계산 수를 줄이기 위한 알고리즘의 수정 및 개선에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

표 4 HS 알고리즘 탐색단계별 최적해

Table 4 The Solution of Search Step by HS Algorithm

Step	Power Loss Change [kW]		Switch Operation [Branch in-out]	
	Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
1	132.40	11.27	16- 8, 17-14	70-66, 71-20, 72-69, 73-47, 74-53
2	121.74	10.98	16-10, 17-14	70- 9, 71-21, 72-69, 73-47, 74-53
3	118.92	10.83	16- 9, 17-14	70-66, 71-19, 72-14, 73-47, 74-53
4	n/a	10.63	n/a	70-10, 71-21, 72-69, 73-47, 74-53
5	-	10.00	-	70-10, 71-21, 72-15, 73-47, 74-53
6	-	9.196	-	-70-, -71, 72-15, 73-47, 74-52
7	-	9.121	-	-70-, -71, 72-15, 73-45, 74-51

## 5. 결 론

본 연구에서는 방사상 배전계통의 손실감소를 목적으로 하는 재구성문제를 위하여 새로운 최적화 방법인 HS 알고리즘을 적용하였다. HS 알고리즘은 화음에 관한 음악적 내용을 기반으로 제안된 알고리즘이며 적용이 간단하고 그 결과가 정확한 알고리즘이며 최적화 문제에 있어서 목적함수의 크기만을 이용해 최적해를 탐색하므로 재구성문제에 있어서 조류계산 결과인 손실만을 정보로 사용하여 선로의 스

위치조작 조합해를 결정함으로써 전역적 최적해를 얻을 수 있다.

사례연구 결과 15모선 계통에 있어서는 약 25%, 69모선 계통에서는 약 56%의 손실을 감소시키는 스위치 조작 결과를 얻을 수 있었으며 이러한 결과로 계통의 평균전압이 재구성전과 비교하여 전체적으로 상승함을 확인하였다. 사례연구를 통하여 본 논문에서 적용한 HS 알고리즘이 최적화 문제의 적용에 있어서 전역적 최적해를 보장할 수 있으며 기존의 알고리즘과는 달리 간단한 문제적용 능력과 정확한 해석결과를 얻을 수 있음을 확인 하였다.

향후 연구로는 재구성 문제의 실제적인 배전계통적용 및 온라인해석을 위해서 여러 가지 특성을 갖는 부하 모델링 및 계통의 불평형성, 그리고 부하 balancing을 고려한 다양한 계통의 사례연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] Civanlar S., Grainger J. J., Yin H., and Lee S. H., "Distribution Feeder Reconfiguration for Loss Reduction", IEEE Trans. on PWRD, vol. 3, pp. 1217-1223, 1988.
- [2] S. K. Goswami and S. K. Basu, "A New Algorithm for the Reconfiguration of Distribution Feeder for Loss Minimization" IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, pp. 1484-1490, 1992.
- [3] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," IEEE Trans. on PWRD, vol. 4, pp. 1401-1407, 1989.
- [4] G. B. Jasmon, L. H. Callistus and C. Lee, "A Modified Technique for Minimization of Distribution System Losses," Electrical Power System Research, vol. 20, pp. 81-88, 1991.
- [5] E. Gauche, J. Coelho, and R. C. G. Teive, "A Mixed back-propagation / Marquardt-Levenberg algorithm for optimizing the distribution electrical systems operation," in 1999 IEE Transmission and Distribution Conf., vol. 2, pp. 753-758.
- [6] M. A. Kashem, V. Ganapathy, G. B. Jasmon and M. I. Buhari, "A Novel Method for Loss Minimization in Distribution Networks," in International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies 2000, pp. 251-256.
- [7] Geem, Z.W., Tseng, C-L. and Park, Y. "Harmony search for generalised orienteering problem: best touring in China", Book Advanced in Natural Computation, Vol. 361, No. 2, Springer Berlin/Heidelberg, 2005
- [8] Lee, K. S. and Geem, Z. W. "A new meta-heuristic algorithm for continuous engineering optimisation: harmony search theory and practice", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 194, pp.3902--3933, 2005
- [9] S. Ghosh and D. Das, "Method for load-flow solution of radial distribution networks," IEE Proc.-Gener.

Trans. Distrib., vol. 146, No. 6, pp. 641-648, Nov. 1999

- [10] M. Baran, F. Wu, "Optimal Capacitor Placement on Radial Distribution System", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 4, No. 1, pp.725-734, January, 1989

Appendix

69Bus Load flow Result (재구성 후)

### [69 BUS LF RESULT REPORT] ###					
BUS No.	V[p.u]	ANGLE[degree]	BUS No.	V[p.u]	ANGLE[degree]
1	1.0000	0.0000	37	0.9999	-0.0020
2	1.0000	-0.0003	38	0.9990	-0.0235
3	1.0000	-0.0005	39	0.9958	-0.0922
4	1.0000	-0.0005	40	0.9951	-0.1124
5	1.0000	-0.0011	41	0.9983	0.0118
6	0.9999	-0.0020	42	0.9983	0.0119
7	0.9992	0.0040	43	0.9982	0.0126
8	0.9985	0.0103	44	0.9982	0.0128
9	0.9983	0.0117	45	0.9982	0.0130
10	0.9982	0.0123	46	0.9858	-0.1826
11	0.9973	0.0203	47	0.9858	-0.1826
12	0.9971	0.0317	48	0.9858	-0.1826
13	0.9967	0.0388	49	0.9858	-0.1826
14	0.9965	0.0421	50	0.9845	-0.1504
15	0.9965	0.0425	51	0.9827	-0.1425
16	0.9938	-0.0773	52	0.9882	-0.0164
17	0.9935	-0.0716	53	0.9882	-0.0165
18	0.9929	-0.0613	54	0.9883	-0.0171
19	0.9929	-0.0612	55	0.9890	-0.0237
20	0.9925	-0.0537	56	0.9971	0.0321
21	0.9922	-0.0489	57	0.9971	0.0321
22	0.9918	-0.0412	58	0.9964	0.0440
23	0.9918	-0.0409	59	0.9964	0.0440
24	0.9916	-0.0382	60	1.0000	-0.0012
25	0.9913	-0.0322	61	0.9997	-0.0100
26	0.9906	-0.0202	62	0.9994	-0.0144
27	0.9903	-0.0152	63	0.9993	-0.0155
28	0.9902	-0.0125	64	0.9992	-0.0155
29	1.0000	-0.0006	65	0.9974	-0.0300
30	1.0000	-0.0015	66	0.9965	-0.0400
31	0.9999	-0.0008	67	0.9964	-0.0501
32	0.9999	-0.0007	68	0.9964	-0.0504
33	0.9999	-0.0001	69	0.9961	-0.0547
34	0.9998	0.0013	70	0.9961	-0.0547
35	0.9997	0.0032			
36	0.9997	0.0035			

U\_max[p.u] = 1.0000, U\_min[p.u] = 0.9827

69Bus Load flow Result (재구성 전)

### [69 BUS LF RESULT REPORT] ###					
BUS No.	V[p.u]	ANGLE[degree]	BUS No.	V[p.u]	ANGLE[degree]
1	1.0000	0.0000	37	0.9999	-0.0013
2	1.0000	-0.0003	38	0.9996	-0.0014
3	1.0000	-0.0006	39	0.9987	0.0033
4	1.0000	-0.0006	40	0.9986	0.0039
5	1.0000	-0.0013	41	0.9934	0.0542
6	0.9997	-0.0048	42	0.9934	0.0543
7	0.9970	0.0209	43	0.9922	0.0657
8	0.9941	0.0477	44	0.9913	0.0755
9	0.9934	0.0541	45	0.9899	0.0809
10	0.9931	0.0574	46	0.9886	0.1021
11	0.9915	0.0855	47	0.9820	0.2312
12	0.9911	0.0917	48	0.9787	0.2955
13	0.9901	0.1093	49	0.9774	0.3209
14	0.9891	0.1278	50	0.9758	0.3518
15	0.9882	0.1435	51	0.9735	0.3721
16	0.9873	0.1591	52	0.9734	0.3729
17	0.9872	0.1620	53	0.9733	0.3739
18	0.9869	0.1668	54	0.9727	0.3791
19	0.9869	0.1669	55	0.9725	0.3806
20	0.9867	0.1696	56	0.9911	0.0021
21	0.9866	0.1713	57	0.9911	0.0021
22	0.9865	0.1741	58	0.9890	0.1297
23	0.9865	0.1741	59	0.9890	0.1297
24	0.9865	0.1745	60	1.0000	-0.0007
25	0.9864	0.1755	61	0.9999	-0.0017
26	0.9863	0.1764	62	0.9999	-0.0016
27	0.9863	0.1768	63	0.9999	-0.0016
28	0.9863	0.1770	64	0.9999	-0.0016
29	1.0000	-0.0006	65	0.9997	0.0009
30	1.0000	-0.0015	66	0.9997	0.0019
31	0.9999	-0.0008	67	0.9997	0.0021
32	0.9999	-0.0007	68	0.9997	0.0021
33	0.9999	-0.0001	69	0.9996	0.0025
34	0.9998	0.0013	70	0.9996	0.0025
35	0.9997	0.0032	71	0.0000	0.0000
36	0.9997	0.0035	72	0.0000	0.0000

U\_max[p.u] = 1.0000, U\_min[p.u] = 0.9725

저 자 소 개



**이 상 봉 (李相奉)**

1968년 2월 22일생. 1994년 한양대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대학교 전력IT 인력양성센터 선임연구원



**김 규 호 (金圭浩)**

1966년 3월 8일생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1996년 안산공과대학 전기과 교수. 현재 한경대학교 전기공학과 교수



**김 철 환 (金喆煥)**

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대 정보통신공학부 교수, 전력IT인력양성센터 센터장  
Tel : 031-290-7124  
Fax : 031-290-7179  
E-mail : hmwkim@hanmail.net