

Development of Three Phase Optimal Power Flow for Distributed Generation Systems

송 화 창[†] · 조 성 구^{*}
(Hwachang Song · Sung-Koo Cho)

Abstract - This paper presents a method of finding the optimal operating point minimizing a given objective function with 3 phase power flow equations and operational constraints, called 3 phase optimal power flow (3POPF). 3 phase optimal power flow can provide operation and control strategies for the distribution systems with distributed generation assets, which might be frequently in unbalanced conditions assuming that high penetration rate of renewable energy sources in the systems. As the solution technique for 3POPF, this paper adopts a simulation-based method of particle swarm optimization (PSO). In the PSO based 3POPF, a utility function needs to be defined for evaluation of the degree in operational improvement of each particle's current position. To evaluate the utility function, in this paper, NR-based 3 phase power flow algorithm was developed which can deal with looped distributed generation systems. In this paper, illustrative examples with a 5-bus and a modified IEEE 37-bus test systems are given.

Key Words : Distributed generation, Loop system, Optimal operation, Particle swarm optimization, 3 phase unbalanced

1. 서 론

최근 전력계통은 독립적으로 운용되는 발전기들이 지속적으로 증가되고 있으며, 이중 많은 수가 연료전지, 마이크로터빈 및 PV 시스템 등과 같은 소규모의 분산전원(distributed generation)의 형태이다. 이들 소규모 분산전원은 부하에 전력을 공급하는 대체 에너지원이며 소규모의 배전계통에 포함되어 국부적인 부하에 대한 전력공급을 목적으로 한다. 따라서 분산전원을 포함하고 있는 분산전원계통에 대한 안전적이고 효율적인 운영 기술에 대한 연구가 필요하다.

배전계통은 부하가 불평형이거나 선로가 적절한 연가(transposition)가 적용되지 않는 경우 등 다양한 원인으로 인하여 3상 불평형 상태에서 운영되고 있어, 송전계통과 같이 3상 평형 해석을 수행하는 데는 한계가 존재하므로 배전계통에 대한 계획 및 운용 단계에서 3상 조류계산의 적용이 필수적으로 요구된다. 또한 일반적으로 배전계통은 방사상으로 구성되나, 분산전원계통은 계통 내에 분포되어 있는 전원들의 효과적인 운용을 위해 엄격한 방사계통으로 구성되지 않을 수 있으며, 이에 따라 선로조류의 방향 및 그 양이 부하 및 원격 전원에 따라 변동될 수 있다.

송전계통에 대한 경제적 및 효율적인 운영 방안을 제공하

는 알고리즘은 최적조류계산(OPF, optimal power flow) [1-2]이다. 최적조류계산은 3상 평형 상태에 있는 계통의 네트워크 제약을 표현하는 조류방정식 제약과 모션 전압 및 선로 조류제약을 표현하는 부등호 제약을 만족하도록 실행 가능 영역(feasible region)에서 주어진 목적함수를 최소화하는 제어 파라미터 값을 제공한다. 본 논문에서는 최적조류계산의 개념을 분산전원계통에 적용한 3상 최적조류계산(3POPF, 3 phase optimal power flow) 프로그램에 대하여 논하고자 한다.

문헌상에서 3상 조류계산에 대한 연구는 아주 활발히 진행되어 왔다. 대표적인 3상 조류계산 해법으로는 모션-임피던스법 [3], 뉴턴-랩슨법 [4-5], 가우스-자이텔 법 [6], decoupled법 [7], hybrid법 [8] 등이 있다. 그러나 3상 최적조류계산에 대하여는 현재까지 많은 연구가 진행되지 않았다. 3상 최적조류계산은 분산전원계통의 불평형 상태를 고려하기 위해 3상 전력조류 방정식을 등호계약으로서 포함하면서 동시에 모션 전압 및 선로조류 등에 대한 운영 제약을 갖는 비선형 최적화(nonlinear optimization)의 문제로 정식화될 수 있다. 문헌 [9]에서 불평형 상태의 전력시스템에 대하여 전압안정도 한계를 구하는 목적으로 SQP(sequential quadratic programming) 법을 적용한 3상 최적조류계산이 개발된 바 있다. 본 논문에서는 분산전원계통의 효율적인 운영을 위한 3상 최적조류계산 프로그램을 입자 군집 최적화(PSO, particle swarm optimization) 알고리즘 [10-12]으로 개발하고 이를 간단한 5모션 시험계통 및 수정된 IEEE 37 모션 시험계통에 적용한 결과를 설명함으로써 그 유용성을 보이고자 한다.

[†] 교신저자, 정회원 : 서울산업대학교 전기공학과 조교수

E-mail : hcsong@snut.ac.kr

^{*} 준 회원 : 서울산업대학교 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2010년 3월 30일

최종완료 : 2010년 4월 26일

2. 3상 최적조류계산 정식

2.1 3상 최적조류계산 (3POPF)

기존의 최적조류계산 [1-2]과 마찬가지로 3상 최적조류계산은 정상상태에서의 전기네트워크의 3상 불평형 상태를 표현하는 3상 조류방정식의 등호 제약과 전압 및 선로조류 등에 대한 운전 제약에 해당하는 부등호 제약을 만족하는 실행 가능 영역 (feasible region) 내에서 주어진 목적함수를 최소화 또는 최대화시키는 해를 구하는 것이다.

본 논문에서 3상 최적조류계산에서 고려하고자 하는 목적함수는 다음과 같다.

$$\min f(\cdot) = \rho_1 \sum_i^{N_g} (\alpha_i P_{gi}^2 + \beta_i P_{gi} + \gamma_i) + \rho_2 P_{loss} \quad (1)$$

여기에서 P_{gi} 는 i 번째 발전기의 유효전력 발전양이며 N_g 는 계통에 포함된 발전기의 수이다. 그리고 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 i 번째 발전기의 발전비용을 표현하는 계수를 나타낸다. 그리고 P_{loss} 는 송전손실이며, ρ_1 과 ρ_2 는 각각 유효전력 발전 비용 및 손실에 대한 계수를 나타낸다.

다음으로 3상 불평형 상태의 전기 네트워크를 표현하는 3상 조류방정식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$0 = P_{gi}^p - P_{di}^p - P_{ti}^p \quad (2)$$

$$P_{ti}^p = V_i^p \sum_{j \in Sim} \sum_{m=a,b,c} V_j^m (G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm})$$

$$0 = Q_{gi}^p - Q_{di}^p - Q_{ti}^p \quad (3)$$

$$Q_{ti}^p = V_i^p \sum_{j \in Sim} \sum_{m=a,b,c} V_j^m (G_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm} - B_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm})$$

여기서 아래첨자 g, d, t 는 각각 발전, 부하, 주입을 의미하며, 위 첨자 p 및 m 은 a, b, c 상 중 어느 한 상을 나타낸다. 식 (2), (3)에서 V_i^p 및 V_j^m 는 i 와 j 번째 모선의 p 상 전압의 크기를 표현하며, θ_i^p 및 θ_j^m 는 i 와 j 번째 모선의 p 상 전압의 위상각을 나타낸다. 그리고 G_{ij}^{pm} 과 B_{ij}^{pm} 는 i 번째 모선의 p 상과 j 번째 모선의 m 상을 연결하는 Y 모선 행렬 성분의 컨덕턴스와 서셉턴스 성분을 표현한다.

3상 최적조류계산의 부등호 제약은 운전제약로서 다음과 같은 제약을 포함한다.

$$P_{ij,\min} \leq P_{ij}^p(V, \delta) \leq P_{ij,\max} \quad (4)$$

$$P_{gi,\min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,\max} \quad (5)$$

$$Q_{gi,\min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi,\max} \quad (6)$$

$$V_{i,\min} \leq V_i \leq V_{i,\max} \quad (7)$$

여기에서 아래첨자 \min 과 \max 는 각 부등호 제약의 최소값 및 최대값을 나타내고 있다. 식 (1-7)에서 $P_{ij}^p(\cdot)$ 은 i 모선의 p 상에서 j 모선으로 주입되는 유효전력 조류의 함수를 나타내고 있으며 그 식은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{ij}^p = V_i^p \sum_{m=a,b,c} V_j^m (G_{ij}^{pm} \cos \theta_{ij}^{pm} + B_{ij}^{pm} \sin \theta_{ij}^{pm}), \quad p=a,b,c \quad (8)$$

위에서 식 (5)과 (6)는 i 번째 유효 및 무효전력 발전기의 출력 제약을 의미하며, 식 (7)은 각 모선의 전압크기 제약을 나타내고 있다.

2.2 분산전원 모델

본 논문에서는 분산전원 모델로서 문헌 [13-14]의 것을 고려하였다. 분산전원 모델은 유효전력 출력이 결정된 상태에서의 단자 전압의 정상 시퀀스 값이 제어되는 형태가 되

어야 한다. 그림 1에서 3상 평형의 내부 전압원을 갖고 (j, k, l)의 3상 단자를 갖는 발전기 모델을 간단히 나타내고 있다.

그림 1에서 나타내고 있는 바와 같이 분산전원 모델은 3상 평형의 내부 여자 전압이 동기 임피던스 행렬 Z_S 를 통해 발전기 단자로 연결되어 있는 형태이다. 분산전원이 단자전압 제어 특성을 가지고 있으며 (j, k, l)의 3상 전압의 정상 시퀀스 성분이 지정 값으로 제어되어야 하며, 3상 발전 출력이 또한 특정된 값으로 유지되어야 한다. 단자 전압 및 유효 전력 출력 제어를 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$1/3(V_j + \alpha V_k + \alpha^2 V_l) - V_{i,spec} = 0 \quad (9)$$

$$\alpha \equiv 1 \angle 120^\circ$$

$$\text{Real}\{V_{j,k,l} \cdot I_i^*\} - P_{i,spec} = 0 \quad (10)$$

$$V_{j,k,l} \equiv [V_j \ V_k \ V_l]$$

$$I_i \equiv [I_{ia} \ I_{ib} \ I_{ic}]$$

여기에서 V_j, V_k, V_l 은 각각 j, k, l 단자에 대한 페이저 전압을 의미하며 I_{ia}, I_{ib}, I_{ic} 는 내부 여자 전압으로부터 발전기 단자로 주입되는 각 상에 대한 전류를 표현한다. 식 (9)와 (10)에서 $V_{j,spec}$ 과 $P_{j,spec}$ 는 각각 i 번째 분산전원의 전압과 유효 전력 출력의 지정값을 나타낸다.

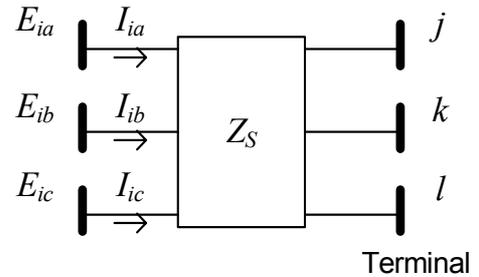


그림 1 분산 발전기 모델

Fig. 1 Distributed generator model

그림 1에서 나타내고 있는 바와 같이 분산전원 모델은 3상 평형의 내부 여자 전압이 동기 임피던스 행렬 Z_S 를 통해 발전기 단자로 연결되어 있는 형태이다. 분산전원이 단자전압 제어 특성을 가지고 있으며 (j, k, l)의 3상 전압의 정상 시퀀스 성분이 지정 값으로 제어되어야 하며, 3상 발전 출력이 또한 특정된 값으로 유지되어야 한다. 단자 전압 및 유효 전력 출력 제어를 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$1/3(V_j + \alpha V_k + \alpha^2 V_l) - V_{i,spec} = 0 \quad (9)$$

$$\alpha \equiv 1 \angle 120^\circ$$

$$\text{Real}\{V_{j,k,l} \cdot I_i^*\} - P_{i,spec} = 0 \quad (10)$$

$$V_{j,k,l} \equiv [V_j \ V_k \ V_l]$$

$$I_i \equiv [I_{ia} \ I_{ib} \ I_{ic}]$$

여기에서 V_j, V_k, V_l 은 각각 j, k, l 단자에 대한 페이저 전압을 의미하며 I_{ia}, I_{ib}, I_{ic} 는 내부 여자 전압으로부터 발전기 단자로 주입되는 각 상에 대한 전류를 표현한다. 식 (9)와 (10)에서 $V_{j,spec}$ 과 $P_{j,spec}$ 는 각각 i 번째 분산전원의 전압과 유효 전력 출력의 지정값을 나타낸다.

그리고 무효전력 출력이 상하한 값에 제한되어 있는 PQ모드의 발전기는 정상 시퀀스 전압값이 제어될 수 없으므로 식 (9) 대신 특정된 무효전력을 출력하도록 하는 식 (10)이 포함되어야 한다.

$$\text{Imag}\{V_{j,k,l} \cdot I_i^*\} - Q_i^{\text{spec}} = 0 \quad (10)$$

$$V_{j,k,l} \equiv [V_j \ V_k \ V_l]$$

$$I_i \equiv [I_{ia} \ I_{ib} \ I_{ic}]$$

여기서 $Q_{i,\text{spec}}$ 는 i 번째 분산전원의 무효전력 출력의 지정값을 나타낸다.

3. 해 법

본 논문에서는 시물레이션 기반의 최적화 기법에 해당하는 입자 군집 최적화 (PSO) 법을 적용한 3상 최적조류계산을 구현하였다. 시물레이션 기반의 최적화 기법은 다수로 생성되는 제어벡터에 대하여 그 목적함수 또는 제약 위반 (violation)을 페널티 함수로 표현하여 목적함수에 포함시킨 확대 목적함수 값을 산정하는 모듈이 필요하다. 일반적으로 시물레이션 기반의 최적화 기법을 이용하여 등호제약을 만족시키는 해를 직접적으로 구하기는 상당히 어려운 것으로 알려져 있다. 즉, 확대 목적함수 값을 산정하는 데 있어 등호제약을 만족시키는 해를 구하는 부분이 추가적으로 구현되어 있어야 한다. 3상 최적조류계산 문제에 있어서 등호제약은 3상 조류방정식이므로 본 논문에서는 뉴턴-랩슨법 기반의 3상 조류계산 프로그램을 개발하여 이를 확대 목적함수 값 산정 시 적용하였다.

3.1 뉴턴-랩슨 (N-R)법 기반 3상 조류계산

서론에서 소개한 바와 같이 3상 불평형 상태에 있는 배전 계통의 정상상태 해석을 위하여 현재까지 많은 방법을 이용한 3상 조류계산 (3 phase power flow) 알고리즘이 개발되었다. 그러나 이들 중 상당 수는 방사상의 배전계통을 가정하여 간략화된 방법으로 계산하는 것으로 루프화된 계통을 다룰 수 없는 한계를 가지고 있다.

본 논문에서 고려하는 분산전원 계통은 공급 신뢰성과 설치된 분산전원의 효율적인 운용을 위해 약간의 망로 (loop path)를 포함하고 있다고 가정한다. 따라서 이를 고려할 수 있는 해법으로 뉴턴-랩슨 기반의 3상 조류계산 알고리즘을 개발하였다.

슬랙 모선을 포함하여 N 개의 모선을 가지고 있는 분산전원 계통에서 슬랙 모선 외에 N_g 개의 분산전원을 포함하고 있다고 하자. 앞 절의 그림 1을 이용하여 설명한 바와 같이 각 분산전원은 3상 평형의 내부 여자 전압으로써 발전기 단자 전압에 제어되므로 분산전원을 고려한 3상 조류계산에서 구해야 하는 변수는 $3(N-1)+N_g$ 개의 전압크기와 위상각이다. 즉 분산전원의 내부 모선 및 슬랙모선을 제외한 $N-1$ 개의 모선은 모두 PQ 모선으로 간주되며, 각 모선에 대하여 a 상, b 상 및 c 상의 전압크기 (V_{ia}, V_{ib}, V_{ic})와 위상각 ($\delta_{ia}, \delta_{ib}, \delta_{ic}$)이 결정되어야 한다. 분산전원의 내부 모선에 대해서는 3상 평형이므로 하나의 전압크기 (E_{ig}), 위상각 (θ_{ig})이 결정되어야 한다.

본 논문에서 고려한 3상 조류계산 방정식은 다음과 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\Delta P_{PQ} \equiv P_{PQ,\text{cal}}(V, \delta, E, \theta) - P_{PQ,\text{spec}} = 0 \quad (11.a)$$

$$\Delta Q_{PQ} \equiv Q_{PQ,\text{cal}}(V, \delta, E, \theta) - Q_{PQ,\text{spec}} = 0 \quad (11.b)$$

$$\Delta P_{PV} \equiv P_{PV,\text{cal}}(V, \delta, E, \theta) - P_{PV,\text{spec}} = 0 \quad (11.c)$$

$$\Delta V_{PV} \equiv V_{PV}(V, \delta, E, \theta) - V_{PV,\text{spec}} = 0 \quad (11.d)$$

여기에서 $P_{PQ,\text{cal}}(\cdot)$ 과 $Q_{PQ,\text{cal}}(\cdot)$ 은 식 (2), (3)에서 표현한 각 PQ 모선의 유효 및 무효전력 주입을 모두 포함하는 나타내는 함수 벡터이며, $P_{PQ,\text{spec}}$ 과 $Q_{PQ,\text{spec}}$ 은 PQ 모선의 발전 및 부하로부터 결정되는 유효 및 무효전력 주입의 특정 값을 나타내는 벡터이다. 식 (11)에서 $P_{PV,\text{cal}}(\cdot)$ 과 $V_{PV}(\cdot)$ 은 PV 모선의 유효전력과 정상 시퀀스 전압을 결정하는 함수벡터이며 $P_{PV,\text{spec}}$ 과 $V_{PV,\text{spec}}$ 은 이들에 대한 제어 값을 나타내는 벡터이다.

다음 식은 N-R법 기반의 3상 조류계산의 수정방정식을 간략하게 표현하고 있다.

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial P_{PQ}}{\partial \delta_{PQ}} & \frac{\partial P_{PQ}}{\partial V_{PQ}} & \frac{\partial P_{PQ}}{\partial E_{PV}} & \frac{\partial P_{PQ}}{\partial \theta_{PV}} \\ \frac{\partial Q_{PQ}}{\partial \delta_{PQ}} & \frac{\partial Q_{PQ}}{\partial V_{PQ}} & \frac{\partial Q_{PQ}}{\partial E_{PV}} & \frac{\partial Q_{PQ}}{\partial \theta_{PV}} \\ \frac{\partial P_{PV}}{\partial \delta_{PQ}} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial V_{PQ}} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial E_{PV}} & \frac{\partial P_{PV}}{\partial \theta_{PV}} \\ \frac{\partial V_{PV}}{\partial \delta_{PQ}} & \frac{\partial V_{PV}}{\partial V_{PQ}} & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_{PQ} \\ \Delta V_{PQ} \\ \Delta E_{PV} \\ \Delta \theta_{PV} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \Delta P_{PQ} \\ \Delta Q_{PQ} \\ \Delta P_{PV} \\ \Delta V_{PV} \end{bmatrix} \quad (12)$$

여기에서 우측항은 각 N-R 단계에서의 상태변수 값에 대한 식 (11)로 결정된 잉여값 벡터 (residual vector)이다.

3상 조류계산은 기존의 전력조류계산 알고리즘에서와 같이 분산전원의 단자전압의 정상 시퀀스 값을 지정된 값으로 유지시키도록 하면서 조류계산을 수행하며, 해가 수렴한 후 무효전력 출력을 최대값 및 최소값과 비교하여 범위를 벗어난 경우 그 출력값을 가장 가까운 최대값 또는 최소값으로 고정시켜 조류계산을 다시 수행한다. 본 논문에서 개발한 3상 조류계산은 소성 (sparsity)을 적용하여 조류계산이 수행되도록 하였으므로 보다 큰 계통을 다룰 수 있도록 하였다.

3.2 입자군집최적화 (PSO)법의 적용

본 논문에서 적용한 확대 목적함수는 다음과 같다.

$$\min F(\cdot) = F(\cdot) + \sum_{i \in S_v} C_i (z_i - z_{\text{lim}})^2 \quad (13)$$

여기서 S_v 는 위반을 경험하는 제약조건 집합을 의미한다. 그리고 $z_i - z_{\text{lim}}$ 은 제약조건 위반양에 해당하는 값이며, C_i 는 제약위반 제약조건 페널티의 크기를 표현하는 계수이다.

PSO의 원리는 해 공간을 탐색하는 여러 개의 입자 (particle)를 정의하고 초기화하고 각 입자들을 이전 단계에서 이동한 속도와 입자 자신이 경험한 최선의 해 (P_{best}) 및 입자 집단의 최선의 해 (G_{best})의 정보를 이용하여 다음 해로 이동하며 보다 향상된 해를 구하는 것이다. PSO의 특징은 알고리즘이 간단하고, 구현하기 쉬우며, 계산시간이 짧고 다른 휴리스틱 알고리즘과 달리 PSO 탐색공간에서 전역해와 국부해 사이를 균형 있게 탐색함으로써 국부해에 조기 수렴하는 것을 극복 할 수 있다는 점이다.

PSO에서 각 입자들은 현재 위치벡터와 속도벡터, 그리고 P_{best} 와 G_{best} 를 이용해서 식 (14)과 (15)에 의해 이동한다.

$$v_i^{k+1} = w v_i^k + c_1 r_1 (P_{\text{best}} - s_i^k) + c_2 r_2 (G_{\text{best}} - s_i^k) \quad (14)$$

$$s_i^{k+1} = s_i^k + v_i^{k+1} \quad (15)$$

여기서 w 는 해당 입자의 이전 스텝에서의 속도에 대한 관성가중치 (inertia weight)를 나타내며, c_1 과 c_2 는 P_{best} 와 G_{best} 에 대한 가속 상수이다. 그리고 s_i^k 과 s_i^{k+1} 은 k 와 $k+1$ 번째 스텝에서의 입자의 위치이며, v_i^k 과 v_i^{k+1} 은 k 와 $k+1$ 번째 스텝에서의 입자의 속도를 의미한다. 그리고 r_1 과 r_2 는 (0,1]의

범위에서 무작위로 생성되는 실수값이다.

본 논문에서 적용한 표준 PSO에 해당하는 선형 감소 관성 가중치를 갖는 PSO-LDIW (Linearly Decreasing Inertia Weight)의 경우 다음과 같은 식으로 각 스텝에서의 관성 가중치가 결정된다.

$$w = w_2 + (w_1 - w_2) \left(\frac{t_{\max} - t}{t_{\max}} \right) \quad (17)$$

여기서 w_1 과 w_2 는 초기 및 최종 스텝에서 적용되기를 원하는 관성가중치이며, t_{\max} 와 t 는 최대 및 현재의 반복회수를 표현한다.

식 (14)에서 관성 정수의 역할은 PSO의 수렴 특성에 있어 아주 중요하다. 관성 정수는 이전 스텝에서의 해당 입자의 속도를 현재 스텝에서 입자의 운동량에 미치는 영향을 조절하는 데 이용된다. 큰 관성 정수를 갖는 경우에는 광역의 탐색에 효과적이며, 반면 작은 관성 정수를 이용하는 경우는 국부적인 탐색과정에 효과적이다. 광역 및 국부적인 탐색을 조화롭게 하기 위해 시간에 따라 변화하는 관성 정수가 적용되며 문헌 [15]에서는 탐색 초기에는 0.9의 값으로부터 시작하여 식 (17)에 따라 마지막 반복 스텝에서는 0.4의 값을 갖도록 선형적으로 감소되는 관성 정수를 이용하였다.

다음은 그림 2과 함께 본 논문에서 제안하는 PSO 기반의 3상 최적조류계산 절차를 간략하게 설명하고 있다.

- Step1:** n 개의 입자 초기화.
- Step2:** 각 입자의 제어 벡터를 적용하여 3상 전력조류계산 수행.
- Step3:** 식 (13)의 확대 목적함수값 및 P_{best} 와 G_{best} 결정.
- Step4:** 수렴 판정.
- Step5:** 관성 가중치 설정.
- Step6:** 식 (14), (15)로 각 입자의 제어벡터 갱신. Step2로 이동.

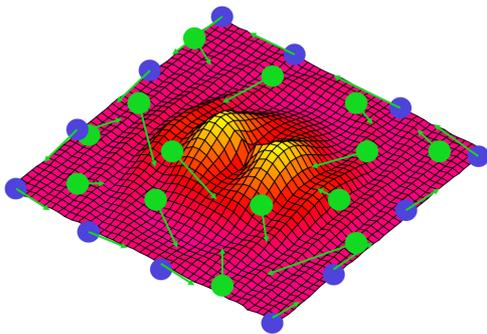


그림 2 PSO법에서 입자의 공간탐색 과정
Fig. 2 Solution space search process of particles in PSO

그림 2에서와 같이 PSO는 임의로 초기화된 n 개의 입자의 제어 벡터로 결정된 확대 목적함수값으로부터 P_{best} 및 G_{best} 를 결정한 후 이들 정보 및 이전 스텝의 해당 입자의 속도 벡터를 이용하여 다음 스텝 위치를 결정한다. 많은 수치적인 연구를 통해 [10-11], PSO는 많은 국부적인 최적점을 갖는 (multi-modal) 전역 최적화 문제의 해를 효과적으로 구할 수 있음이 증명되었다. 본 논문에서는 [12]에서 개발한 연속 변수를 위한 PSO-LDIW를 적용하여 3상 최적조류계산을 구현하였다.

4. 사례연구

본 연구에서는 간단한 5모선 및 수정된 IEEE 37모선 시험계통에 대하여 PSO 기반 3상 최적조류계산을 적용한 결과를 설명하고자 한다.

4.1 간단한 5모선 시험계통

그림 3은 간단한 5모선 시험계통의 단선도를 나타내고 있다. 기본적인 네트워크 데이터는 [16]의 것을 이용하였다. 시험계통의 전체 부하는 473 [MW]이다. 2번 모선의 분산전원의 발전단자 제어 정상 시퀀스 전압은 1.01 [pu]로 설정하였고 충분한 무효전력을 공급할 수 있다고 가정하였다. 그리고 발전기의 정상 리액턴스 (X_1)는 0.2 [pu], 역상 리액턴스 (X_2)는 0.04 [pu], 그리고 영상 리액턴스 (X_0)는 0.02 [pu]의 값을 이용하였다.

먼저 본 연구에서 개발한 3상 조류계산 프로그램을 이용하여 초기 계통 상태를 먼저 검토한다. 개발 3상조류계산 알고리즘을 적용한 결과 5회 반복 후 최대 mismatch가 수렴 허용 한계에 해당하는 0.001 [pu] 미만의 값을 나타냈다.

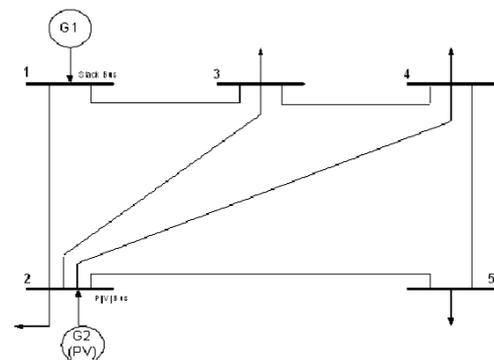


그림 3 5모선 시험계통 단선도
Fig. 3 One-line diagram of 5-bus test system

그림 4는 3상 조류계산 수행 시의 최대 mismatch의 변화를 나타내고 있다.

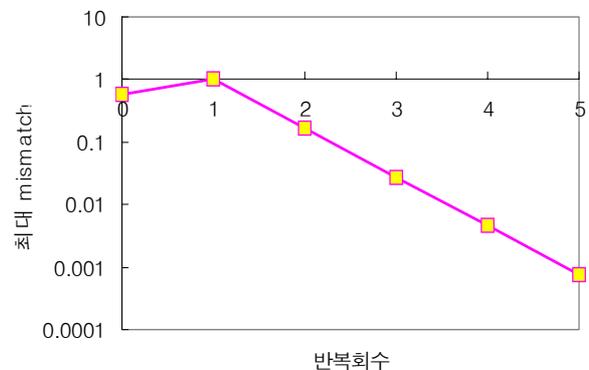


그림 4 3상 조류계산 시 최대 mismatch의 변화 (5모선 계통)
Fig. 4 Change of max. mismatch in 3 phase power flow (5-bus test system)

표 1은 얻어진 조류해에서의 모든 모선의 각 상별 데이터를 보여 주고 있다. 조류계산 상태에서의 유효전력 손실은 13.9354 [MW]이다. 표 1에서 2번 모선의 정상시퀀스 전압은 1.01 [pu]로 전압 제어가 수행되고 있음을 알 수 있으며, 내부 여자 전압은 $1.121482 < 0.94$ [pu]의 값을 나타냈다.

표 1 3상 조류해에서의 모선 데이터 (5모선 계통)

Table 1 Bus data at 3 phase power flow solution (5-bus system)

모선	상	V [pu]	δ [°]	P_g [pu]	Q_g [pu]	P_d [pu]	Q_d [pu]
1	A	1.01	0	1.2397	-0.2871	0	0
	B	1.01	240	1.1836	-0.3193	0	0
	C	1.01	120	1.2461	-0.3137	0	0
2	A	1.009508	-3.15	0.437	0.5414	0.2	0.1
	B	1.011028	237	0.3219	0.5162	0.18	0.09
	C	1.009467	116.81	0.4411	0.5879	0.22	0.11
3	A	0.981935	-5.67	0	0	0.45	0.15
	B	0.987937	235.02	0	0	0.44	0.15
	C	0.978766	114.67	0	0	0.43	0.15
4	A	0.982514	-6.06	0	0	0.4	0.05
	B	0.988803	234.77	0	0	0.35	0.05
	C	0.977962	114.3	0	0	0.38	0.05
5	A	0.982952	-7	0	0	0.58	0.09
	B	0.988432	234.35	0	0	0.5	0.08
	C	0.969785	113.19	0	0	0.6	0.1

다음으로 PSO 기반 3상 최적조류계산 알고리즘을 적용하고자 한다. 본 모의에서의 목적함수는 발전기 유효전력 발전 비용 함수 최소화로서 표 2에서 본 모의에서 적용한 발전기 유효전력 발전비용 및 발전제약 데이터를 나타내고 있다. 2번 모선 전압제약은 0.98~1.04 [PU]로 설정하였으며, 부하모선의 전압제약은 0.97~1.05 [pu]을 이용하였다. 식 (13)에서 전압제약 위반에 따른 페널티 계수 (C)는 10^{10} 으로 설정하였다. 본 모의에서 적용한 목적함수는 유효전력 손실최소화만을 포함하도록 하였으며, 이를 위해 식 (1)에서 ρ_1 는 1.0으로, ρ_2 는 0으로 설정하였다.

표 3은 본 모의에서 적용한 PSO 파라미터 값들을 나타내고 있다. PSO는 10개의 입자를 이용하여 해공간을 탐색하며, 최대 반복회수에 해당하는 100회 수행 후 탐색을 중단하도록 하였다. 본 모의에서의 제어벡터는 1번 및 2번 모선의 유효전력 발전과 2번 모선의 정상 시퀀스 전압이다. 5모선 계통에 대한 PSO 3POPF의 평균 수행시간은 8.6 [sec]이다.

표 2 유효전력 발전 비용 계수 및 제약 데이터

Table 2 Active power generation cost and constraints data

모선	α	β	γ	P_{max} [MW]	P_{min} [MW]
1	0	4	0	600	200
2	0.15	3	0	400	100

표 3 본 모의에서 이용한 PSO 파라미터

Table 3 PSO parameters used in this simulation

c_1	2.0	w_{max}	0.9
c_2	2.0	w_{min}	0.4
r_1	(0,1]	입자 수	10
r_2	(0,1]	최대반복	100

그림 5는 10회의 독립적인 PSO 기반 3상 최적조류계산 (3POPF)을 수행했을 때 가장 좋은 해를 탐색한 경우에 대한 각 반복회수에 대한 식 (13)으로 표현되는 적합함수의 변화를 나타내고 있다. 표 4는 PSO 기반 3POPF를 통해 얻은 최종해의 모선 데이터를 보여주고 있다.

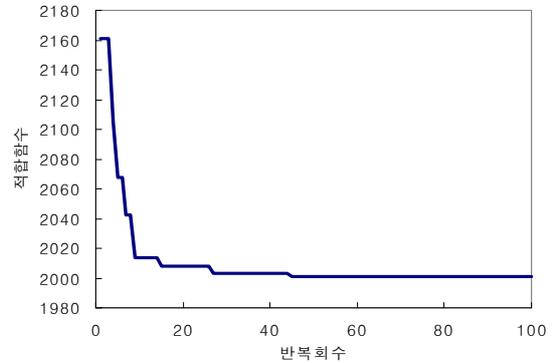


그림 5 PSO 3POPF 수행 시 적합함수의 변화 (5모선 계통)

Fig. 5 Change of the fitness function in PSO 3POPF (5-bus test system)

표 4 3POPF 수행 후 최적해의 모선 데이터 (5모선 계통)

Table 4 Bus data at 3POPF solution (5-bus system)

모선	상	V [pu]	δ [°]	P_g [pu]	Q_g [pu]
1	A	1.01	0	1.2397	-0.2871
	B	1.01	240	1.1836	-0.3193
	C	1.01	120	1.2461	-0.3137
2	A	1.009508	-3.15	0.437	0.5414
	B	1.011028	237	0.3219	0.5162
	C	1.009467	116.81	0.4411	0.5879
3	A	0.981935	-5.67	0	0
	B	0.987937	235.02	0	0
	C	0.978766	114.67	0	0
4	A	0.982514	-6.06	0	0
	B	0.988803	234.77	0	0
	C	0.977962	114.3	0	0
5	A	0.982952	-7	0	0
	B	0.988432	234.35	0	0
	C	0.969785	113.19	0	0

4.2 수정된 IEEE 37모선 시험계통

다음으로 수정된 IEEE 37모선 시험계통에 대하여 PSO 3POPF를 적용한 결과를 설명하고자 한다. 그림 6은 수정된 IEEE 37모선 시험계통의 단선도를 나타내고 있다. IEEE 37 모선 시험계통에 대한 정상 시퀀스 네트워크 데이터는 [17]의 것을 적용했으며 다음과 같은 추가적인 부분이 고려되었다.

- 모든 송전선로의 영상 시퀀스 저항은 3배의 정상 시퀀스 저항의 값을 사용하였다. ($R_0=3R_1$) 그리고 영상 시퀀스 리액턴스는 3.5배 정상 시퀀스 리액턴스값을 이용하였다. ($X_0=3.5X_1$)
- 변압기는 Y-Y 결선되어 있으며 중성점이 직접접지되어 있다고 가정한다.
- 3상 불평형은 부하에 존재한다고 가정한다.

- 선로 22-29와 22-26을 추가하였으며, 두 선로의 파라미터는 선로 7-8의 것을 이용하였다.

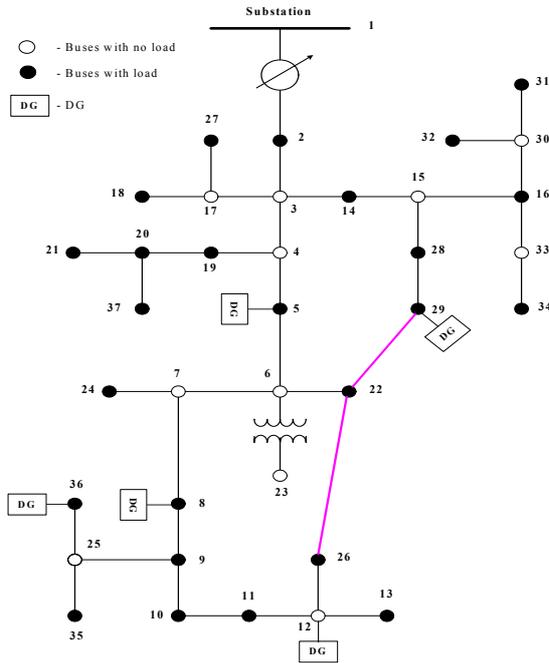


그림 6 수정된 IEEE 37모선 시험계통 단선도
 Fig. 6 One-line diagram of the modified IEEE 37-bus test system

본 연구에서 적용한 데이터는 21~37모선까지의 부하에 3상 불평형성이 있으며 특히 21, 24, 32, 34, 35, 37번 모선은 a상에 대해서만 부하가 존재하도록 하였다. 즉, 다른 두 상의 부하는 0으로 설정하였다. 그림 6에서 나타내고 있는 바와 같이 분산전원이 5개소에 설치되어 있다고 가정하였다. 표 5에서 분산전원에 대한 유효전력 출력과 전압 및 무효전력의 상하한 제약을 설명하고 있다.

표 5 3POPF 수행 후 최적해의 모선 데이터 (5모선 계통)
 Table 5 Bus data at 3POPF solution (5-bus system)

모선	P_g [kW]	$V_{1,spec}$ [pu]	Q_{max} [kVAr]	Q_{min} [kVAr]	V_{max} [pu]	V_{min} [pu]
5	10	0.99	6	-6	0.98	1.04
8	20	0.99	12	-12	0.98	1.04
12	10	0.99	6	-6	0.98	1.04
29	30	0.99	18	-18	0.98	1.04
36	20	0.99	12	-12	0.98	1.04

먼저 본 논문에서 개발한 N-R법 기반 3상 조류계산 알고리즘을 이용하여 조류계산을 수행하였다. 9회의 N-R 반복회수 수행 후 수렴하였으며, 그림 7는 3상조류계산 수행 중 조류방정식의 최대 mismatch의 변화를 나타내고 있다. 조류계산 상태에서의 유효전력 손실은 7.24344 [kW]이다.

그림 7에서 알 수 있는 바와 같이 4회 N-R 반복 후 모든 모선에서의 유효 및 무효 전력조류방정식의 mismatch가 수렴허용 한계 (10^{-3} [pu]) 미만의 값을 나타내었으나, 분산전원들의 무효전력 공급 능력을 벗어나는 출력을 나타내게 되

어 각 발전기 별로 해당되는 상한 또는 하한 값으로 무효전력 출력을 고정시킨 후 다시 조류계산을 수행하여 9회 반복에서 수렴조건을 만족시키는 해를 구하였다. 최종해에서의 각 분산전원 별 무효전력 한계 출력은 표 5에서 밑줄로 표시된 값에 해당한다.

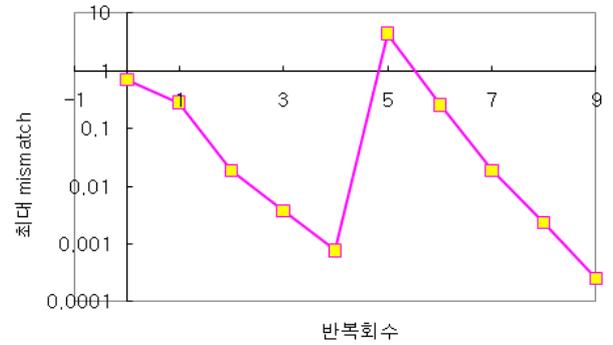


그림 7 3상 조류계산 시 최대 mismatch의 변화 (37모선 계통)
 Fig. 7 Change of max. mismatch in 3 phase power flow (37-bus test system)

다음으로 PSO 3POPF의 적용 결과를 설명하고자 한다. 본 모의에서 적용한 목적함수는 유효전력 손실최소화만을 포함하도록 하였으며, 이를 위해 식 (1)에서 ρ_1 는 0으로, ρ_2 는 100.0으로 설정하였다. 그리고 5모선 계통에 적용된 PSO 파라미터를 같이 사용하여 모의하였다. 10회의 독립적인 PSO 3POPF 수행 후 가장 좋은 해를 나타내는 예에 대하여 설명하고자 한다. 본 시험 계통에 대한 PSO 3POPF의 1회 독립 실행에 대한 평균 수행시간은 약 45.9 [sec]이다.

그림 8에서 PSO 반복회수에 따른 목적함수의 변화를 표현하고 있다. PSO 반복을 지난 후 목적함수 (유효전력 손실)는 7.41439 [kW]에서 6.93250 [kW]로 감소하였다. 이 값은 기본 조류계산의 경우보다 작은 유효전력 손실에 해당하는 값이다. 표 6은 각 분산전원의 상별 전압, 유효 및 무효 전력 출력값 및 내부 여자 전압을 나타내고 있다. 표 6에서 시스템 정격용량은 100 [kVA]이다.

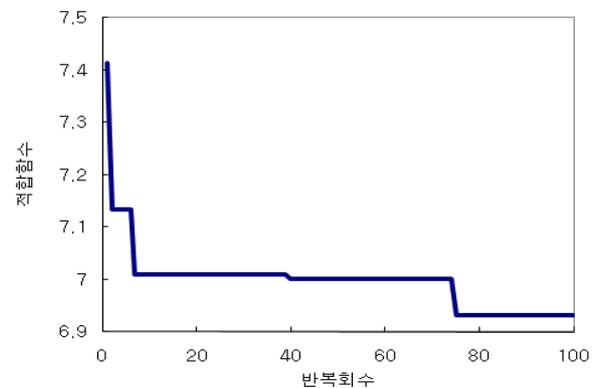


그림 8 PSO 3POPF 수행 시 적합함수의 변화 (37모선 계통)
 Fig. 8 Change of the fitness function in PSO 3POPF (37-bus test system)

표 6에서 분산전원 중 몇 기는 유효 또는 무효전력 출력이 상별로 음(-)을 나타내는 결과를 보이고 있다. 이는 3상 평형 상태에 있는 여자기 전압을 가정하는 모델을 적용하였고 주변 모선의 부하가 a상에만 존재하는 이유로 이렇게 나타내고 있다고 볼 수 있다. 그리고 본 예에서는 분산전원의 무효전력의 양이 충분하지 않아 적합함수값을 가장 작도록 하는 경우의 조류해에서 모든 분산전원의 무효전력 출력이 상한값을 나타내고 있다. 따라서 분산전원에서 공급하는 무효전력 능력이 작은 경우에 대해서는 분산전원의 무효전력 출력을 몇 단계로 나누어 출력단자 전압을 제어하는 것보다 무효전력 출력을 제어하도록 하여 분산전원계통 내의 유효전력 손실을 감소하도록 하는 방법이 대안으로 적용될 수 있다. 이 경우 보다 빠르게 최적해를 산정할 수 있을 것으로 판단된다.

표 6 분산전원의 상별 전압 및 출력 (37모선 계통)
Table 6 DGs' phase voltages and outputs (37-bus system)

모선	상	V [pu]	δ [°]	Pg [pu]	Qg [pu]	E[pu]	θ [°]
5	A	0.988482	-0.18	0.1079	0.1189	0.99526	0.32
	B	0.992789	239.99	0.0246	-0.0609		
	C	0.99219	119.99	-0.0324	0.002		
8	A	0.986746	-0.19	0.1472	0.1236	0.99736	0.70
	B	0.990506	240.01	0.0396	-0.0307		
	C	0.990159	119.97	0.0132	0.0273		
12	A	0.984786	-0.19	0.1006	0.0685	0.99048	0.31
	B	0.986801	240.02	-0.0089	-0.012		
	C	0.987503	119.94	0.0083	0.0038		
29	A	0.990662	-0.1	0.1168	0.1211	1.00506	1.09
	B	0.993139	240.03	0.0708	0.0466		
	C	0.994465	119.9	0.1123	0.0123		
36	A	0.986154	-0.2	0.1439	0.0944	0.99616	0.70
	B	0.988728	240.03	0.0177	-0.0062		
	C	0.98892	119.94	0.0384	0.032		

5. 결 론

본 논문에서는 분산전원계통의 운용을 목적으로 적용될 수 있는 3상 최적조류계산 (3POPF)의 개발에 대하여 논하였다. 3POPF 해법으로서 입자 군집 최적화 (PSO) 기법을 적용하였다. PSO를 적용할 경우 등호제약의 해를 구하는데 시뮬레이션 기반의 해법을 적용하는 데 한계가 있으므로 본 연구에서는 3상 조류계산 모듈을 추가적으로 개발하여 PSO 3POPF를 개발하는 데 적용하였다. 개발된 3상 조류계산 모듈은 3상 평형의 내부 여자 전압의 제어로 정상 시퀀스 단자전압을 조정하는 형태의 것을 포함하고 있다. PSO 3POPF는 그 개발이 쉽고 전역 최적화를 위해 적용이 가능하므로 효과적으로 최적해를 탐색할 수 있으며, 특히 해공간의 차원이 작은 문제, 즉 분산전원과 같은 작은 규모의 계통 또는 선택적인 제어변수의 동작만을 고려하는 경우에 효과적으로 적용될 수 있다.

감사의 글

본 연구는 지식경제부 재원으로 2008년 전력·원자력 개발 사업 (전력선행)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] H.W. Dommel, W.F. Tinney, Optimal power flow solutions, IEEE Trans. Power App. and System, PAS-87 (1968) 1866-1876.
- [2] B. Stott, O. Alsac, A.J. Monticelli, Security analysis and optimization, Proc. IEEE, 75 (1987) 1523-1644.
- [3] A. H. El-Abiad, D. C. Tarsi, "Load flow study of untransposed EHV networks," Proc. of the IEEE Power Industry Computer Application (PICA) Conference, Pittsburgh, USA, 1967, pp. 337-384.
- [4] R. G. Wasley, and M. A. Shlash, "Newton- Raphson algorithm for three phase load flow," IEE Proceedings, vol. 121, 1974, pp. 631-638.
- [5] K. A. Birt, J. J. Graf, J. D. McDonald, and A. H. El-Abiad, "Three phase power flow program," IEEE Trans. PAS, vol. 95, 1976, pp. 59-65.
- [6] M. A. Laughton, and A. O. M. Saleh, "Unified phase coordinate load flow and fault analysis of polyphase networks," International Journal of Electrical Power and Energy Systems, vol. 2, 1980, pp. 181-192.
- [7] J. Arrillaga, and B. J. Harker, "Fast-decoupled three phase load flow," IEE Proceedings, vol. 125, 1978, pp. 745-740.
- [8] B. K. Chen, M. S. Chen, P. W. Shoults, and C. C. Liang, "Hybrid three phase load flow," IEE Proceedings - C, vol. 137, 1990, p. 177-185.
- [9] G. Carpinelli, D. Lauria and P. Varilone, "Voltage stability analysis in unbalanced power systems by optimal power flow," IEE proc. - GTD, vol. 153, no. 3, 2006, pp. 261-268.
- [10] R. Eberhart, and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," Proc. of 6th Int'l Symposium on Micro Machine and Human Science, Nagoya, Japan, 4-6 Oct. 1995.
- [11] A. Ide and K. Yasuda, "Abasic study of adaptive particle swarm optimization," Electrical Engineering in Japan, vol. 151, no. 3, March 2005, pp. 41-49.
- [12] H. Song, R. Diolata and Y.-H. Joo, "Photovoltaic system allocation using discrete particle swarm optimization with multi-level quantization," Journal of Electrical Engineering & Technology, vol. 4, no. 2, pp. 185-193, 2009.
- [13] J. Arrillaga and C. P. Arnold, Computer modelling of electrical power systems, John Wiley & Sons, 1983.
- [14] A. Abur, H. Singh, H. Liu and W. N. Klingensmith,

"Three phase power flow for distribution systems with dispersed generation," Proc. of 14th PSCC, Sevilla, 24-28, June 2002.

- [15] Y. Shi, and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimizer," Proc. of IEEE Int'l Conference on Evolutionary Computation, Anchorage, AK, 4-9 May, 1998.
- [16] 송화창, 분산전원계통 운용을 위한 3상 최적조류계산의 개발, 전력선행기술 연구개발 보고서, 2009년 12월.
- [17] A. Al-Hinai, K. Sedhisigarchi, and A. Feliachi, "Stability Enhancement of a Distribution Network Comprising a Fuel Cell and a Microturbine," Proc. of IEEE PES General Meeting, June 6-10, 2004.

저 자 소 개



송 화 창 (宋 和 昌)

1997년 고려대 전기공학과 졸업. 1999년, 2003년 동 대학원 석사, 박사학위 취득. 2003-2004년 미국 아이오와 주립대 Post-doctoral scholar. 2005-2008년 4월 군산대학교 전자정보공학부 조교수. 현재 서울산업대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 02-970-6403

E-mail : hcsong@snut.ac.kr



조 성 구 (趙 成 九)

2009년 서울산업대 전기공학과 졸업. 현재 서울산업대학교 전기공학과 석사과정.