병렬 PSO 알고리즘을 이용한 전력계통의 전압제어

박종국*, 김종율**, 박준호*, 이화석**
부산대학교*, 한국전기연구원**,동의과학대학***

Optimal Control of Voltage and Reactive Power Using Parallel PSO Algorithm

Jong Kook Park*, Jong Yul Kim**,June Ho Park*, Hwa Seok Lee***
Pusan National University*, KERI**, Dong-Eui Institute of Technology***

Abstract - 전력계통이 점점 더 복잡하고 광역화됨에 따라서 전압 및 무효전력 제어는 매우 중요한 문제로서 부각되고 있다. 전압 제어를 위해서는 전력계통 내의 조상설비들을 최적으로 운용하는 것이 중요하다. 따라서 전력계통에서 효과적인 전압제어를 위해서는 가능한 모선전압 크기의 차이가 없이 전압 분포가 이루어지는 것이 효과적이다. 본 논문의 목적함수로는 각 부하모선의 전압편차의 합을 최소화 함 을 사용하였으며, 최적 해를 찾는데 소요되는 연산시간을 단축시키기 위해 PC클러스터 기반 병렬 PSO 알고리즘을 이용한 기법을 제안하였다. 제안한 기법의 유용성을 보이기 위하여 IEEE 30모선 계통의 문제에 적용하였다. 검토결과 최적해 탐색성능의 저하 없이 연산시간을 단축할 수 있음을 확인하였다.

1. 서 론

전력 계통이 점점 더 복잡해지고 커져감에 따라 정상상태에서의 전력손실 감소 및 전압 특성 향상뿐만 아니라 상정사고시의 저전압 발생 문제 등을 해결하기 위해서는 전압 및 무효전력의 적절한 제어가 필요하다. 일반적으로 전압 및 무효전력 제어는 전력 계통내의 변압기 탭, 발전기 단자전압, 조상설비 등의 적절한 조작을 통해 이루어진다. 이에 대한 연구로 전력용 콘덴서 최적 배치[1],광역 전력 계통에서 로컬 네트워크 모델링 및 decomposition을 이용한 계통 규모 축약에 의한 계산 시간 단축[2],simulated annealing 등을 이용한 최적화 기법[3]등 다양한 연구가 진행되었다. 효과적인 전력계통의 전압제어를 위해서는 가능한 모선 전압의 차이가 없이 전압 분포가 이루어지게 하는 것이 효과적이다. 이를 위해 본 논문에서는 기존의 휴리스틱한 최적화 방법보다 연산과정이 간단하여 계산 부담이 상대적으로 적고, 실제구현이 용이한 PSO 알고리즘을 이용하였고, 연산시간의 단축을 위해서 여러 개의 프로그램들 또는 프로그램의 분할된 부분들을 다수의 프로세서가 분담하여 동시에 처리하는 기술인 병렬 PC 클러스터 시스템을 사용하였다.

2. PC 클러스터 기반 병렬 PSO 알고리즘

2.1 PSO 알고리즘 개요

PSO는 새로운 진화연산기법의 일종으로 물고기의 떼와 조류의 무리와 같은 조직체의 행위에 관한 연구에서 동기가 유발되었다[4-6]. PSO의 특징은 알고리즘이 간단하고, 계산시간이 짧으며 다른 휴리스틱 알고리즘과는 달리 PSO 탐색공간에서 전역해와 국부 해 사이를 균형 있게 탐색함으로써 조기 수렴하는 것 을 극복 할 수 있다는 점이다. 각 개체는 현재의 위치 벡터와 속도 벡터 및 Pbest, Gbest를 이용해서 식 (1)에 의해 이동을 하게 된다. 여기서 속도는 각 탐색점의 방향을 변화시킬 수 있고, 식 (1a)의 전역 및 국부탐색의 결합을 볼 수 있다. 각 개체의 위치 벡터 수정은 현재의 위치와 수정된 속도를 이용해서 식 (1b)과 같이 갱신된다.

v = wv + crand(Pbest - s) + crand(Gbest - s) (1a)
s = s + v (1b)

여기서, v : i 번째 개체의 k 번째 속도 벡터
s : i 번째 개체의 k 번째 위치 벡터
v : i 번째 개체의 k+1 번째 속도 벡터
s : i 번째 개체의 k+1 번째 위치 벡터
N : 개체의 총 수 , k = 1,2, …, N ,
w, c , c : 가중치 계수
Pbest: i 번째 개체가 지금까지의 탐색 중 발견한 최적의 위치 벡터
Gbest: 전체 개체가 지금까지의 탐색 중 발견한 최적의 위치 벡터

2.2 병렬 PSO 알고리즘 개요

일반적으로 해집단 탐색을 토대로 하는 진화연산기법에서 해집단의 크기는 탐색성능에 직접적인 영향을 미치는 중요 파라미터중의 하나이다. 본 논문에서는 동일한 수준의 탐색성능을 유지하면서 연산시간을 단축하기위해서 병렬 PSO 알고리즘을 제안하고 이를 PC 클러스터 시스템을 이용하여 병렬화 하였다. 병렬 PSO는 해집단을 여러 개의 서브 해집단으로 나누고 서로 인접한 서브 해집단과 정보를 교환하는 링 구조로 되어있다. 이들 서브 해집단들은 각각 독립적으로 탐색을 수행하고, 수행된 탐색정보를 인근 해집단과 상호 교환함으로써 탐색성능의 저하 없이 연산시간을 단축할 수 있다.

2.3 PC 클러스터 시스템 구축

PC 클러스터 시스템이란 다수의 PC 또는 workstation을 고속네트워크로 연결하여 하나의 컴퓨팅 시스템으로 사용하는 것으로 고성능 또는 고가용성을 얻을 수 있도록 하는 기술을 말한다. 본 논문에서 사용하기 위해 구축한 것은 Ethernet switch기반 Fast ethernet방식의 6-node PC 클러스터 시스템이다. 운영 체제는 Windows 2000 server와 Windows2000 pro를 사용하였으며,NIC으로는 Fast ethernet card를 사용하여 스위칭 허브로 연결하였고, 데이터 전송은 TCP/IP를 이용한 MPI library를 이용하였다. 원격 관리프로그램으로 symantec PCanywhere, 병렬프로그래밍을 위해 MS Visual C++ 6.0을 사용하였다.

3. 전압제어 문제 정식화

효과적인 전력계통의 전압제어를 위해서는 가능한 모선전압 크기의 차이가 없이 전압 분포가 이루어지는 것이 효과적이다. 특히, 상정사고 발생 시에는 상정사고가 발생한 모선을 중심으로 전압이 크게 강하하며, 상대적으로 상정사고의 영향을 적게 받는 모선의 경우는 비교적 적은 전압 강하가 발생하여 모선간의 전압차를 커지게 한다. 이런 계통 상황에서 전압의 크기가 큰 모선에서 전압이 작은 모선으로 무효전력이 이동하게 된다. 그러나 전력계통의 전압의 크기를 모두 같게 유지시키는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 가능하면 특정 범위 내로 유지하여 상대적으로 전압의 분포를 고르게 하고, 이때 발생하는 손실을 최소화하는 것이 바람직하다[7]. 따라서 본 논문에서는 부하모선의 전압편차의 합의 최소화를 목적함수(식(2))로 설정하였다

$$J = VD(x,u) = \sum_{i=1}^{Nb} \left| V_i - V_i^{sp} \right| \quad (2)$$

여기서 V_i^{sp}는 각 i모선 전압의 지정된 값이며 1pu로 둔다. Nb는 각 부하 모선의 번호이다. 상태변수x^T는 부하모선 전압V_L ,발전기의 무효전력 출력 Q_G,,선로의 용량S_L이고, 제어변수 u^T는 발전기 모선전압 V_G , 변압기의 탭비 T , 전력용 콘덴서의 투입량 Sh_i이다.

1) 등식 제약조건으로 각 모선에서의 전력조류 방정식이 있다.

$$P_{G_i} - P_{D_i} - f_P(x,u) = 0 \quad (3)$$

$$Q_{G_i} - Q_{D_i} - f_Q(x,u) = 0 \quad (4)$$

여기서 P_{G_i}, Q_{G_i}는 i번째 발전기의 유효전력 및 무효전력이고, P_{D_i}, Q_{D_i}는 각 I번째 모선의 유효전력 및 무효전력이다.

다음은 부등식 제약조건이다. 제어변수에 관한 제약조건으로

2) 발전기 모선의 전압 V_G 크기와 발전기의 무효전력 출력 용량.

$$V_{G_i}^{\min} \le V_{G_i} \le V_{G_i}^{\max} \quad (5)$$

$$Q_{G_i}^{\min} \le Q_{G_i} \le Q_{G_i}^{\max} \quad (6)$$

3) 변압기의 탭비

$$T_i^{\min} \le T_i \le T_i^{\max} \quad (7)$$

4) 발전기 모선의 전압크기와 선로조류제약.

$$V_{L_i}^{\min} \le V_{L_i} \le V_{L_i}^{\max} \quad (8)$$

$$S_{L_i} \le S_{L_i}^{\max} \quad (9)$$

5) 전력용 콘덴서 투입량

$$Sh_i^{\min} \le Sh_i \le Sh_i^{\max} \quad (10)$$

4. 사례연구

본 논문에서 제시한 기법의 효과를 검증하기 위해서 IEEE-30모선[8]에 적용하여 그 결과를 검토 하였다. 이 계통은 6개의 발전기, 21개의 부하모선, 41개의 선로로 구성되어 있다. 전압제어의 목적함수는 부하모선이 전압편차이 합을 최소화하도록 설정하였으며, 제어변수는 6개 발전기 모선의 전압 크기, 4개 변압기 탭 비, 9개 전력용 콘덴서 투입량으로 총 19개이다. 변압기 탭 비는 0.9pu~1.1pu, 전력용 콘데서 투입량은 0pu~0.05pu, 발전기 모선전압은 0.95~1.1pu로 설정하였다. 표1에서는 최적조류계산시 PSO 알고리즘에서 사용한 시뮬레이션 계수를 나타냈다.

<표 1> PSO 알고리즘 파라미터

파라미터	설정치
세대수	50
해집단의 수	60
c_1, c_2	2.0
w	0.9~0.4

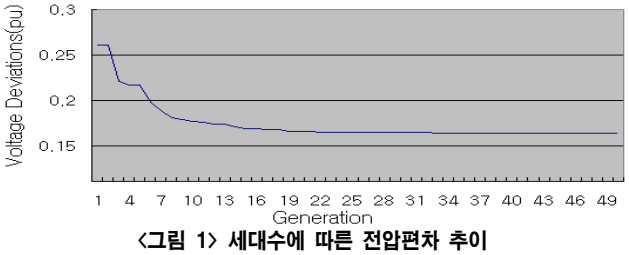
표2 에서는 PSO 알고리즘을 이용한 최적 목적함수 값이 도출 되었을 때 최적 제어변수의 결과이다

.

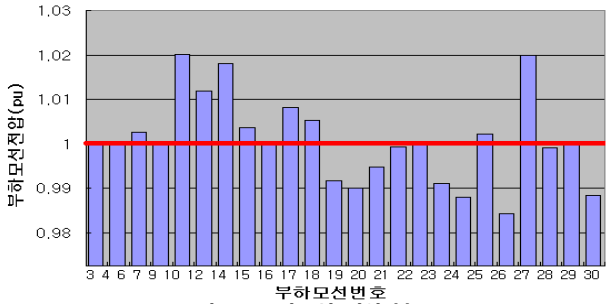
<표 2> 시뮤레이션 결과

V_{G1}	0.997(pu)	Sh_{10}	0.0063(pu)
V_{G2}	1.025(pu)	Sh_{12}	0.0439(pu)
V_{G5}	1.016(pu)	Sh_{15}	0.0052(pu)
V_{G8}	1.017(pu)	Sh_{17}	0.0182(pu)
V_{G11}	1.029(pu)	Sh_{20}	0.0370(pu)
V_{G13}	1.038(pu)	Sh_{21}	0.0309(pu)
$T_{(4-12)}$	0.974	Sh_{23}	0.0104(pu)
$T_{(6-9)}$	0.900	Sh_{24}	0.0236(pu)
$T_{(6-10)}$	0.971	Sh_{29}	0.0068(pu)
$T_{(27-28)}$	0.943		

그림 1에서는 프로세서 1대로 실행하였을때, 세대수 증가에 따른 부하모선의 전압편차의 합의 변화추이를 나타내고 있다. 세대수가 증가함에 따라 점차 감소하여 50세대에서는 0.164(pu)로 수렴함을 알 수 있으며, 소요되는 전체 연산시간은 3.048초로 나타났다. 그림 2에서는 이때 각 부하모선 전압(pu)의 분포를 나타내고 있다.



<그림 1> 세대수에 따른 전압편차 추이



<그림 2> 부하모선 전압 분포

표3, 표4에서는 기존 PSO와 병렬 PSO의 각 모선전압편차의 합 및 연산시간 결과를 나타내고 있다. 프로세서의 수는 해 집단의 수를 60개로 가정하였기에, PC 클러스터 시스템에서 해 집단이 분배되어 실행될 때 같은 수의 집단이 프로세서에 할당되게 하기 위하여 그 수를 2대,3대,6대로 실행하였다. 표에서 알 수 있듯이 목적함수 값은 병렬화 이전과 거의 동일한 수준의 값을 나타내었으며, 연산시간은 1대의 프로세서를 사용하는 경우 약 3.048초가 소요되었으며, 6대를 사용한 경우 평균 약 1.034초가 소요되어 본 논문에서 목적한 탐색성능의 저하 없는 연산시간 단축을 확인할 수 있었다.

<표 3> 각 모선전압 편차의 합 (pu)

프로세서의 수	Min	Max	Ave
1	0.164	0.168	0.165
2	0.162	0.172	0.165
3	0.163	0.168	0.164
6	0.162	0.169	0.165

<표 4> 연산시간이 비교 (sec)

프로세서의 수	Min	Max	Ave
1	2.828	3.391	3.048
2	1.703	1.968	1.834
3	1.250	1.593	1.337
6	0.953	1.078	1.034

5. 결 론

보다 신뢰성 높고 효율적인 전력계통의 운영 및 계획을 위해서 전력계통의 전압제어는 매우 중요한 문제로서 부각되고 있다. 효과적인 전압제어를 위해서는 가능한 모선 전압의 차이가 없이 전압 분포가 이루어지게 하는 것이 효과적이다. 본 논문에서는 진화연산 기법의 일종인 PSO 알고리즘을 이용한 전압제어 문제의 시간단축을 위하여 PC 클러스터 시스템 기반 병렬 PSO 알고리즘을 제안하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 IEEE 30모선에 적용하여, 프로세서 수에 따른 최적해 탐색능력과 연산시간을 비교검토 하였다. 검토결과, 본 논문에서 제안한 방법을 적용할 경우 탐색성능 저하 없는 연산시간 단축효과를 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제 (R-2005-7-064)임.

[참 고 문 헌]

[1] Baran, M, and Wu, F:"Optimal capacitor placement on radial distribution system",IEEE Trans. on Power Delivery,4(1),725-734(1989)

[2] Kobayashi,H. and et al : "Diakoptic approach to sensitivity analysis in large-scale systems", IEEE/PES Summer Meeting, Los Angeles, Paper No. A78531-6(1978).

[3] Liang,R.H and Wang, Y.S : "Main Transformer ULTC and capacitors scheduling by simulated annealing approach", Electrical power & Energy systems, 5(2), 531-538 (2001).

[4] J. Kennedy and R. Eberhart, "Particle Swarm Optimization", Proceedings of IEEE international Conference on Neural Networks (ICNN '95), Vol. 4,pp.1942-1948, 1995.

[5] P. Angeline, "Using selection to improve particle swarm optimization", In Proc. of Int. Conference on Evolutionary Computation, Alaska, USA, May 1998.

[6] Y. Shi and R. Eberhart, "A modified particle swarm optimization", In proc. of IEEE Int. Conf. on Evolutionary Computation, Anchorage, USA, May 1998.

[7] Kundur, P:Power system stability and control, McGraw-Hill(1994)

[8]K. Y. Lee, Y. M. Park, and J. L. Ortiz "A United approach to optimal real and reactive power dispatch", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-104, No. 5, pp. 1147-1153, 1985.