

### E. Coli Bacterial Foraging 최적화에 기준한 배전용 Nonconvex 경제급전 알고리즘

\*이상성 \*\*김동현 \*\*김문경 \*\*노디르 노베코프 \*\*\*이승근 \*\*박종근 \*\*문승일 \*\*윤용태  
\*기초전력연구원, \*\*서울대학교 전기컴퓨터공학부, \*\*\*전주대학교

### E. Coli Bacterial Foraging Optimization based Distribution Nonconvex Economic Dispatch Algorithm

\*\*S.S. Lee \*\*D.H. Kim \*\*M.K. Kim \*\*N. Norbekov \*\*H.C. Lee \*\*\*S.K. Lee \*\*J.K. Park \*\*S.I. Moon \*\*Y.T. Yoon  
\*KESRI, \*\*Seoul National Univ., \*\*\*JeonJu Univ.

**Abstract** - 본 논문에서는 대장균 먹이찾기(E. Coli Bacterial Foraging)를 최적화 기법에 도입한 사례로서 이를 이용하여 Nonconvex 배전용 경제급전 알고리즘(distribution economic dispatch: DED)을 제안한다. 제안된 DED 알고리즘은 향후 지역이나 구역 발전사업자를 중심으로 배전계통운용시스템에 필요한 경제급전 알고리즘으로 활용 할 수 있다.

#### 1. 서 론

개인발전사업자나 민간발전사업자가 배전계통에 개입하게 되면 소규모 발전기를 중심으로 구역별 배전운용시스템이 필요하게 된다. 배전관리 시스템(Distribution Management System: DMS)에서 배전계통의 조류계산 및 최적조류계산은 기본적인 배전계통 운용에 필요한 데이터를 제공한다. 즉, 재배치와 복구, 전압조정, Var/전압 협조, 고장분석을 위하여 P, Q, V, θ 및 비용을 계산하는 것이 기본적인 역할이라 할 수 있다. 본 논문에서는 대장균 먹이찾기(E. Coli Bacterial Foraging)를 최적화 기법에 도입한 사례이다. 이를 이용하여 Nonconvex 배전용 경제급전 알고리즘(Distribution Economic Dispatch: DED)에 적용한 경우이다. 제안된 DED 알고리즘은 향후 지역이나 구역 발전사업자를 중심으로 배전계통운용시스템에 필요한 조류계산이나 최적조류계산, 경제급전 알고리즘으로 활용 할 수 있다.

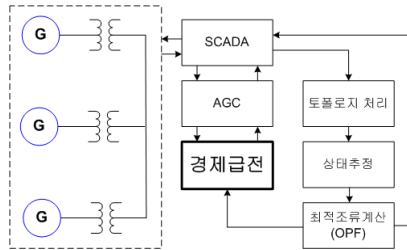


그림 1. 경제급전 블록선로

#### 2. Nonconvex 경제급전 문제 [1]

경제급전 목적함수 :

$$\text{Min } F_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) = \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i) \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} = P_{Load} + P_{Loss} \quad (2)$$

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, i = 1, 2, \dots, N_G \quad (3)$$

발전기 경사비율 제약조건 :

$$\text{Max}(P_{Gi}^{\min}, P_{Gi}^0 - DR_i) \leq P_{Gi} \leq \min(P_{Gi}^{\max}, P_{Gi}^0 + UR_i) \quad (4)$$

$i = 1, 2, \dots, N_G$

제한 운전 영역 :

$$P_{Gi} \in \begin{cases} P_{Gi} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{LB_1} & k = 2, 3, \dots, N_{PZ_i} \\ P_{Gi}^{UB_{k-1}} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{LB_k} & k = N_{PZ_i} \\ P_{Gi} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{LB_1} & i = 1, 2, \dots, N_{GPFZ} \end{cases} \quad (5)$$

$$F_i(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i + |e_i \sin(f_i(P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}))| \quad (6)$$

$$F_i(P_{Gi}) = a_{ik} P_{Gi}^2 + b_{ik} P_{Gi} + c_{ik} + |e_{ik} \sin(f_{ik}(P_{Gi}^{\min} - P_{Gi}))| \quad (7)$$

if  $P_{Gi,k}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi,k}^{\max}$  fuel option  $k, k = 1, 2, \dots, N_F$

#### 3. E. Coli Bacterial Foraging 최적화 [2,3]

대장균 구조:

그림 2와 같이 대장균은 원형질 막(plasma membrane), 세포벽, 세포질과 핵을 담은 캡슐 등으로 구성되어 있다. 섬모(pilus)는 다른 대장균으로 유전 정보를 전송할 때 쓰며, 편모(flagellum)는 운동에 사용된다. 세포의 지름은 1µm 정도, 길이는 2µm 정도이며, 무게는 1 피코그램에 70%가 물로 이루어져 있다. 살모넬라균이 비슷한 박테리아이다. 대장균은 미생물 중에 가장 알려진 종류이다. 대장균은 제어 시스템(유도 시스템)이 있어서 식량을 찾고 해로운 물질을 피하도록 해준다. 예를 들어, 알칼리성이나 산성 환경에서 멀리 헤엄쳐서 보다 중성적인 곳으로 이동하게 된다. 대장균의 행동을 설명하기 위해, 우리는 이것의 발동자(편모), “판단용” 감지기, 페 루프 행동(즉, 다양한 환경에서 움직이는 법 - 자동 행동)에 대해 설명할 것이다. 대장균이 일종의 약진 탐색법을 사용한다는 것도 보게 될 것이다.

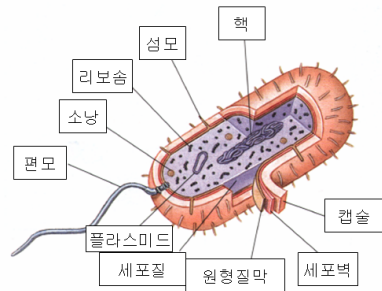


그림 2. 대장균 외형

편모를 통한 헤엄치기(swimming)와 구르기(tumbling):

대장균은 비교적 뾰족한 편모 여러 개를 이용하여 움직이는데, 각각이 같은 방향으로 초당 100~200바퀴 회전함으로써 헤엄을 칠 수 있게 된다(제어 시스템에서는 편모가 발동을 일으키는 것에 해당한다). 각 편모는 왼쪽으로 감긴 나선 형태여서, 편모 끝부분에서 세포 방향으로 보았을 때 편모의 뿌리 부분(세포에 연결된 위치)이 시계반대방향으로 회전하게 되면 박테리아에 대한 반발력이 생겨 세포를 밀게 된다. 각 편모가 프로펠러라고 생각하면 된다. 만약에 편모가 시계방향으로 돌면, 세포를 잡아당긴다. 공학적인 관점에서 편모 뿌리 부분의 회전축은 매우 흥미로운 기구인데, 생물학자들은 이것을 “만능 관절(universal joint)”이라고 부르는 것 같다(뾰족한 편모가 세포를 기준으로 임의의 방향을 “가리킬” 수 있기 때문). 그림 3과 같이 대장균은 두 방법으로 움직일 수 있다. 헤엄치거나 구를 수 있는데, 평생 동안 이 두 방법을 번갈아가며 움직인다(즉, 편모가 정지하는 경우는 매우 드물다).

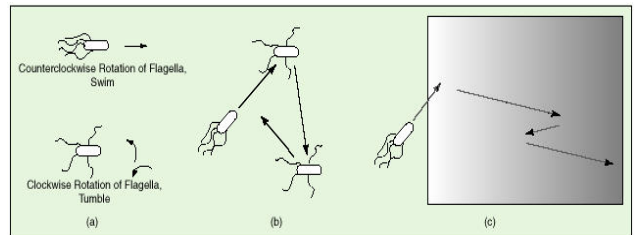


그림 3. 대장균의 헤엄치기와 구르기

**자동 행동(motile behavior), 변화도(gradient) 있는 영양분 올라가기:** 화학적 유인 물질과 혐오 물질의 존재에 대해 박테리아가 일으키는 행동 패턴을 주화성(chemotaxis)라고 부른다. 대장균의 경우 세린(serine)이나 아스파르트산염(aspartate)과 유인 반응을 일으키고, 혐오 반응은 Ni나 Co의 금속 이온, pH의 변화, 로이친(leucine) 같은 아미노산, 아세트산염(acetate) 같은 유기산에 대해 일어난다. 대장균 무리에서 나타나는 종합적인 행동 패턴은 어떨까? 일반적으로, 무리를 이루어 영양분을 찾고 유해한 현상을 피하려고 하는데, 현미경으로 관찰해보면 의도적으로 무리를 지어 이동하는 것처럼 보이므로 지능적인 행동이 나타나는 것 같은 인상을 준다. 주화성 행동이 일어나는 것을 설명하려면 대장균이 헤엄치는 시간을 결정하는 원리를 설명해야 한다. 그래야 구르기와 헤엄치기에서 무슨 일이 일어나는지를 알 수 있다. 먼저, 대장균이 중성적인 물질(영양분이나 독성물질이 없는) 내에 오랫동안(1분 이상) 있게 되면, 편모가 동시에 시계방향과 시계반대방향으로 회전하는 것을 번갈아 하여 구르기와 헤엄치기를 반복하게 된다. 두 행동이 반복되면서 박테리아를 아무데나 무작위로 움직이게 하는데, 이런 행동으로 영양분을 탐색하는 것이 가능해진다.

**내재된 감지 및 결정 장치:**

대장균의 “결정” 시스템은 도함수(derivative)를 이끌어낼 능력이 있어야 하는 점이 흥미로운데, 결국 일종의 기억력이 있어야 한다는 것이다. 처음 보기에는, 박테리아가 세포 양 끝부분에서 농도를 감지하고 간단히 그 차이를 찾아서 농도의 변화도를 알아내는 것(공간적인 도함수)이 가능할 것으로 보인다. 그러나 이는 실제와는 다르다. 실험 결과에 따르면 대장균이 일종의 표본 채취를 하고, 잠깐 전의 농도를 기억하고 있다가 현재의 농도와 비교를 하고, 그 차이에 따라서 결정을 내리게 되는 것이다(즉, 시간 도함수에 대한 오일러 근사를 계산하는 것과 같다). 실제로, 박테리아의 내부 결정 과정이 일종의 적분 제한 제어 장치라는 것을 최근에 보여주기도 했다. 요컨대, 기억력, 일종의 덧셈 기계, 비교 능력, 간단한 내부 “제어 법칙”, 화학적 감지 및 운동 기능 등을 통해 박테리아가 복잡한 탐색 및 회피 행동을 이룰 수 있다는 것을 보게 된다. 진화가 이런 제어 시스템을 빚어낸 것이다. 이 시스템은 개체의 관점에서 볼 때 매우 튼튼하고 목표를 이루는데 매우 성공적이다.

**자동 행동과 떼 지음(swarming):**

대장균은 강한 푸른빛을 피하려고 하므로 주광성이 있다. 대장균과 살모넬라균을 포함한 여러 자동력 박테리아에서 관찰되는 특별히 흥미로운 집단행동이 있는데, 반고체 영양분 매체에서 복잡한 안정적 시공 패턴(떼 지음)을 형성한다는 것이다(미생물학자는 “떼 지음”을 다른 종류의 박테리아의 특성에 한정하고 있으나, 우리는 여기서 이 용어를, 별 같은 보다 고등한 동물의 행동을 설명할 때 사용하는 의미로 바꿔쳐서 사용할 것이다). 대장균 무리를, 단일 영양분 화학 작물체를 가진 반고체 한천(agar)의 한가운데에 놓게 되면, 무리가 영양분 소비를 하면서 생긴 영양분 변화도를 따라 원형을 지어 중심에서 나오게 된다. 더욱이, 고농도의 호박산염(succinate)을 영양분으로 쓸 경우 세포들이 유인 물질인 아스파르트산염을 분비하게 되어 무리가 집종되게 되는데, 곧 높은 박테리아 밀도를 가진 환형 패턴의 무리를 지어 이동하게 된다. 공간적인 정렬 형태는 밖으로 나가려는 원형의 운동과 국지적으로 분비되는 유인 물질에 의해 형성된다. 세포들이 서로 유인 신호를 보내게 되어 떼를 짓게 되는 것이다. 패턴의 형성은 배후에 아스파르트산염을 분포함으로써 억제할 수 있다(신호의 방향성을 제거하여 화학적 신호를 혼란시키기 때문으로 보인다). 패턴 형성은 두 종류의 자극(세포 간 신호 작용, 식량획득 운동)이 주도하여 나타나는 것으로 보인다.

**최적화에 이용되는 대장균의 떼 지음 식량획득 행동:**

경사  $\nabla J(\theta)$ 에 대한 측정이나 해석적 설명이 없는 경우  $J(\theta), \theta \in R^p$ 의 극값을 찾으려고 한다고 하자. 여기서 우리는 박테리아 식량획득에서 얻은 아이디어를 가지고 비 경사 최적화 문제를 풀게 된다. 먼저,  $\theta$ 가 박테리아의 위치라고 하고,  $J(\theta)$ 가 주변 환경에 있는 유인 물질과 혐오 물질에 의한 복합적인 영향을 나타낸다.  $J(\theta) < 0, J(\theta) = 0, J(\theta) > 0$ 는 각각 위치 $\theta$ 에서 박테리아가 영양분이 풍부한, 중립적인, 또는 독성물질이 있는 상황을 나타낸다. 기본적으로, 식량획득 과정으로써 주화성은 영양분이 집중된 곳으로 올라가고(보다 낮은  $J(\theta)$ )값을 찾고 독성 물질을 피하며 중립적인 매체에서 빠져나가려고 발버둥치는( $J(\theta) \geq 0$ 인 위치 $\theta$ 를 피하려는) 최적화를 내세우고 있다. 난보(random walk)의 일종도 포함하고 있다.

**주화성, 떼 지음, 번식, 제거, 분산:**

주화성 단계를, 구르기를 한 번 하고 그 다음에 다시 구르거나, 구르기를 한 번 하고 그 다음에는 헤엄치는 것으로 정의한다. j를 주화성 단계의 지표(index)로 놓고, k를 번식 단계의 지표로 놓고, l을 제거-분산 단계의 지표로 놓는다. 다음은 j번째 주화성 단계, k번째 번식 단계, l번째 제거-분산 단계에서 S 박테리아의 무리 내의 개별 개체의 위치를 나타낸다.  $J(j, k, l) = \theta^i(j, k, l) | i = 1, 2, \dots, S$  I번째 박테리아의 위치  $\theta^i(j, k, l) \in R^p$ (단순히  $\theta^i$ 로 표기하기도 한다)에서의 비용이  $J(i, j, k, l)$ 이라고 한다.

$$P(j, k, l) = \{\theta^i(j, k, l) | i = 1, 2, \dots, S\} \tag{8}$$

$$\theta^i(j+1, k, l) = \theta^i(j, k, l) + C(i)\phi(j) \tag{9}$$

$$J_{cc}(\theta, P(j, k, l)) = \sum_{i=1}^S J_{cc}^i(\theta, \theta^i(j, k, l)) \tag{10}$$

$$= \sum_{i=1}^S \left[ -d_{attract} e^{-w_{attract} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2} \right] + \sum_{i=1}^S \left[ h_{repellant} e^{-w_{repellant} \sum_{m=1}^p (\theta_m - \theta_m^i)^2} \right]$$

**4. 최적화 알고리즘 [1]**

$$Swarm = [X_1, X_2, X_3, \dots, X_j, \dots, X_{N_{par}}] \tag{11}$$

$$(P_{G_{min}} - \epsilon - X_{ij}^{initial}) \leq V_{ij}^{initial} \leq (P_{G_{max}} + \epsilon - X_{ij}^{initial}) \tag{12}$$

$$i = 1, 2, \dots, N_G \quad j = 1, 2, \dots, N_{par}$$

$$PF_T = \sum_{i=1}^{N_G} F_i(P_{Gi}) + \lambda_{PB} \times \left[ \sum_{i=1}^{N_G} P_{Gi} - (P_{Load} + P_{Loss}) \right] + \lambda_{PB} \left[ \sum_{i=1}^{N_G} Z_i \right] \tag{13}$$

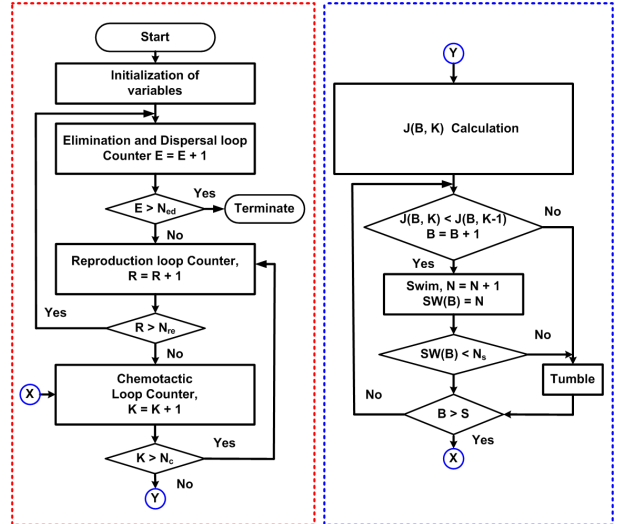
$$Pbest_j^t = X_j^{t-1} + V_j^t \quad \text{if } PF_{Tj}^t < P_{Tj}^{t-1} \tag{14}$$

$$Pbest_j^t = Pbest_j^{t-1} + V_j^t \quad \text{if } PF_{Tj}^t \geq P_{Tj}^{t-1} \tag{15}$$

$$Pworst_j^t = X_j^{t-1} + V_j^t \quad \text{if } PF_{Tj}^t > P_{Tj}^{t-1} \tag{16}$$

$$Pworst_j^t = Pworst_j^{t-1} \quad \text{if } PF_{Tj}^t \leq P_{Tj}^{t-1} \tag{17}$$

**<Bacteria Foraging algorithm>**



**4. 결 론**

본 논문에서는 대장균 먹이찾기(E. Coli Bacterial Foraging) 최적화에 기준한 Nonconvex 배전용 경제급전알고리즘(distribution economic dispatch: DED)을 제안하였다. DED 알고리즘은 향후 지역이나 구역 사업에 대비한 배전운용시스템의 경제급전 알고리즘으로 활용될 수 있다.

**[참 고 문 헌]**

[1] A. I. Selvakumar, "A New Particle Optimization Solution to Nonconvex Economic Dispatch Problems", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 42-51, Feb., 2007.  
 [2] K. M. Passino, "Biomimicry of Bacterial Foraging for Distributed Optimization and Control", *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 52-67, June, 2002.  
 [3] M. Tripathy and S. Mishra, "Bacteria Foraging-Based Solution to Optimize Both Real Power Loss and Voltage Stability Limit", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 22, No. 1, pp. 240-248, Feb., 2007.

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원 주관으로 수행된 과제이며 관계 기관에 감사드립니다.