

UPFC를 이용한 과도안정도 에너지마진 향상

이승길^o 김수남 유석구
한양대학교

Improvement of Transient Stability Energy Margin by using UPFC

Sung-Gul Lee Soo-Nam Kim Seok-Ku You
Hanyang University

Abstract - This paper presents a method for determination of UPFC control quantity in order to enhance the power system transient stability energy margin using Genetic Algorithms in multi-machine system. We use the minimization of energy margin as the object function in GA. To get critical energy, we use the potential energy boundary surface(PEBS) method. PEBS is one of the transient energy function(TEF) method. And we used the series voltage compensator as the UPFC model. The proposed method is applied to 6-bus, 7-line, 4-machine model system to show its effectiveness.

1. 서 론

전력 수요의 증대와 더불어 전력 계통의 복잡화, 대용량화되는 한편 전력의 질적 향상에 대한 인식이 점점 고조되면서 계통의 안정적 운용을 위한 조류제어, 전압제어, 안정도 향상에 필요한 기술 개발이 요구되고 있다. 최근, FACTS는 이러한 문제를 해결할 수 있는 대체 수단으로 평가되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 계통외란시, FACTS를 이용하여 사고선로가 아닌 기존의 정상선로를 통한 전력전송을 증진시켜 계통 안정도를 향상시킬 수 있다. 특히, 지금까지 개발된 FACTS 기기중 가장 진보된 기기로 알려져 있는 UPFC는 모선전압과 선로의 유·무효전력 조류를 자유롭게 제어 할 수 있는 능력을 가지고 있다[1].

UPFC의 과도안정도 적용 평가를 위해서는 UPFC의 조류계산 해석모델의 개발이 매우 중요한데, 최근 UPFC가 계통에 미치는 영향을 직렬전압원의 전압크기와 위상각의 함수로 표현된 부하로 처리한 직렬전압원 형태의 UPFC 해석모델이 개발되었다[2]. 이 모델은 자코비안 행렬을 수정해줌으로써 기존의 뉴턴랩슨법을 이용하여 조류해석이 가능하다. 그러나, 과도안정도 에너지 함수측면에서는 계통외란시 고장제거후에 UPFC의 동작으로 인해 변화된 계통의 임계에너지를 나타낼 수 있는 별도의 계통해석이 필요하다.

본 연구에서는 과도안정도 에너지마진을 결정함에 있어 적절한 UPFC의 해석모델을 선정하고 에너지마진에 따른 적정량의 UPFC 제어량을 결정함으로써 계통 외란시 과도안정도를 증진시키고자 한다. 안정도 향상을 위해 UPFC의 조류계산모델인 직렬전압원의 전압크기와 위상각 제어량은 유전알고리즘을 이용하여 에너지마진의 경계값에 가깝게 결정하였다[3]. 과도에너지 함수를 이용하여 에너지마진을 구하는데 있어서, 불안정 평형점은 PEBS법을 사용하여 실제 대기 계통에 적용이 가능하게 하였다. 제안된 알고리즘을 4기 6모선 7선로 계통에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

2. 본 론

2.1 과도에너지 마진

전력계통 안정도 해석에 있어서 TEF법은 과도에너지마진(V_{EM})의 계산을 기본으로 하고 있다[4]. 이러한 과

도에너지마진을 계산하기 위해서는 두 개의 에너지 값을 계산해야 하는데, 그 첫째가 고장제거순간의 위치에너지와 운동에너지의 합으로 계산되는 과도에너지(V_{TR})이고 두 번째로 계산되어야 하는 것이 계통 고유의 임계에너지(V_{CR})이다.

$$V_{EM} = V_{CR} - V_{TR} \quad (1)$$

본 논문에서, 과도에너지는 고장제거 순간까지를 시간모의법인 Runge-Kutta법으로 계산한 위상각과 각속도를 이용하여 구하였고, 계통의 임계에너지를 구하기 위해서 PEBS방법을 사용하였는데, PEBS법은 고장중의 위상각과 각속도의 고장 궤적에 따라 위치에너지의 첫 번째 최대값이 임계에너지라는 가정을 이용한 방법이다[4].

2.2 UPFC의 직렬전압원 모델

UPFC가 설치된 선로의 전력조류의 증감을 양모선에서 부하로 처리한 모델을 이용하였는데 이것은 과도 안정도 해석시 부하를 병렬 어드미턴스로 변환하기에 적절하다. 즉, 기존의 일정 부하값에, UPFC로 인해 변환된 부하를 추가하여 어드미턴스로 환산하면 에너지 함수에 있어서 고장제거후의 계통 상태를 적절하게 표현할 수가 있다.

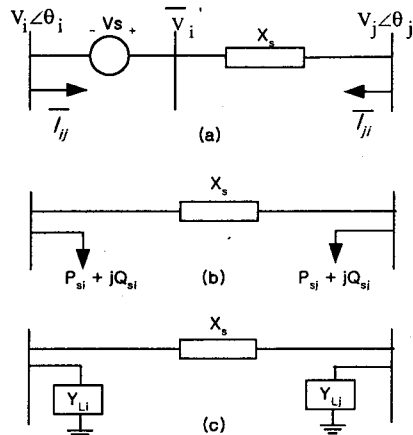


그림 1 안정도 해석을 위한 UPFC의 등가회로

즉, 그림 1의 (a)그림과 같이 UPFC에 의해 i와 j 모선 사이에 이상적인 직렬전압원 \bar{V}_s 가 있다고 하면, \bar{V}_i 는 식(2)과 같다.

$$\bar{V}_i = \bar{V}_s + \bar{V}_j \quad (2)$$

$\bar{V}_s = r \bar{V}_i e^{j\alpha}$ 이고, 여기서 \bar{V}_s 는 UPFC에 의해 제어되고, 전압크기

보상률(r)은 $r = |\bar{V}_s|/|\bar{V}_i|$ 로 정의된다. 범위는 $0 < r < r_{\max}$ 이고 위상의 범위는 $0 < \gamma < 2\pi$ 이다. (a)의 등가회로는 그림(b)와 같이 모선 i와 j에 주입된 부하로 모델링 될 수 있다. 여기서, 각각의 부하는 식(3)과 같다[2].

$$\begin{aligned} P_{si} &= rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \\ P_{sj} &= -rb_s V_i V_j \sin(\theta_{ij} + \gamma) \\ Q_{si} &= rb_s V_i^2 \cos \gamma \\ Q_{sj} &= -rb_s V_i V_j \cos(\theta_{ij} + \gamma) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $b_s = 1/X_s$ 이다.

등가화된 부하는 안정도 해석시 일정 임피던스로 가정되어 병렬 어드미턴스로 변환된다. 즉, i모선에서는 식(4)과 같이 G와 B의 값으로 변환된다.

$$Y_i = G_i + jB_i = \frac{P_{si} - jQ_{si}}{|V_i|^2} \quad (4)$$

병렬 어드미턴스로 변환된 부하는 계통 축약과정에서 load admittance matrix를 구성시 식(5)와 같이 기존의 부하값에 추가되어 그림(c)와 같이 구성할 수 있다[4].

$$\text{Diag}(Y_{Li}) = \begin{bmatrix} Y_{Lg} + Y_i & 0 \\ 0 & Y_{Li} + Y_j \end{bmatrix} \quad (5)$$

여기서, i는 발전기 모선, j는 부하모선일 때 Y_{Lg} 는 기존의 발전기 모선의 부하, Y_{Li} 는 부하모선의 부하이다.

이렇게 구성된 load admittance matrix는 고장제거시 UPFC가 동작된 후의 계통상태를 나타내게 되고 G와 B 값은 계통이 과도시 발생한 운동에너지를 흡수 소비할 수 있는 임계에너지의 파라미터로서 작용하여 임계에너지의 증감을 가져온다. 식(6)은 사용된 임계에너지 함수이다. [4]

$$\begin{aligned} V_{CR} &= - \sum_{i=1}^n P_i (\theta_i^u - \theta_i^{cl}) \\ &- \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n [C_{ij} (\cos \theta_{ij}^u - \cos \theta_{ij}^{cl})] \\ &- D_{ij} \left[\frac{\theta_i^u - \theta_i^{cl} + \theta_j^u - \theta_j^{cl}}{\theta_{ij}^u - \theta_{ij}^{cl}} \right] (\sin \theta_{ij}^u - \sin \theta_{ij}^{cl}) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서, $P_i = P_{mi} - |E_i|^2 G_{ii}$, $C_{ij} = |E_i||E_j|B_{ij}$, $D_{ij} = |E_i||E_j|G_{ij}$, n은 발전기 모선수, E_i 는 발전기 내부기전력, P_{mi} 는 발전기의 기계적입력, θ^u 는 불안정평형점, θ^{cl} 는 고장제거 순간의 발전기 위상각이다.

2.3 유전 알고리즘

직렬전압원으로서 UPFC의 적절한 전압크기와 위상각 산정을 위해 전역적 탐색기법인 유전알고리즘을 이용하였다. 제안하고자 하는 최적화 방안은 UPFC를 사용하여 해당 선로에 보상하고자 하는 전압(\bar{V}_s)을 변화시키면서 계통의란후 불안정한 상태의 에너지마진과 계통안정을 위해 설정한 에너지마진과의 차를 최소화하는 것이다.

2.3.1 초기화

UPFC의 직렬보상전압의 크기와 위상각을 동시에 결정하기 위해 하나의 개체에 두 개의 변수값을 초기화한다. 즉, 전압크기 보상률(r)과 위상각(γ)의 상하한값

사이에서 random하게 발생하여 2진수로 지정하였다.

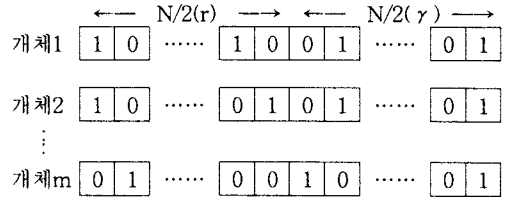


그림 2 염색체의 2진 초기화

$$\begin{aligned} r &= r_{\min} + \text{decimal}(001\dots010_2) \cdot \frac{r_{\max} - r_{\min}}{2^{N/2} - 1} \\ \gamma &= \gamma_{\min} + \text{decimal}(101\dots011_2) \cdot \frac{\gamma_{\max} - \gamma_{\min}}{2^{N/2} - 1} \\ r_{\min} &= \gamma_{\min} = 0.0, \quad r_{\max} = 0.1, \quad \gamma_{\max} = 360 \\ N &\text{은 염색체의 전체길이, } m \text{은 개체의 수이다.} \end{aligned}$$

2.3.2 목적함수의 정식화

고려대상인 불안정상태의 에너지마진과 목표치의 에너지마진과의 차이를 최소화하고 적합도는 최대화 되도록 GA의 목적함수를 구성하였다[2].

$$\text{Fitness} = \frac{1}{P(X) + 1.0}$$

여기서,

$$P(X) = \text{Min}|V_{EXP} - V_{EM}|, \quad X = [r, \gamma]$$

여기서, V_{EXP} 는 일정하게 유지하고자 하는 에너지마진 값이다. 본 논문에서는, V_{EXP} 을 안정도의 여유를 위해 0.01로 하였다. 불안정한 상태의 에너지마진 V_{EM} 은 항상 음의 값이므로, 결국 보상해야 할 전체 마진은 목표 값과의 합이 된다.

2.3.3 연산자

복제(reproduction), 교차(simple crossover), 돌연변이(non-uniform mutation)의 3가지 유전자 작용자를 이용하여 개체의 유전자를 변화시킨다[5].

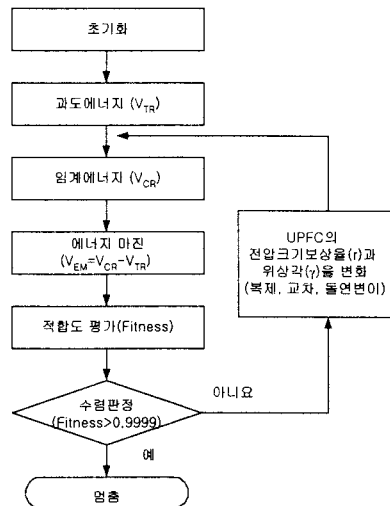


그림 3 GA를 이용한 UPFC의 적정제어량 결정

2.4 사례연구

제안된 알고리즘의 효용성을 증명하기 위하여 IEEE 과도안정도 Test 모델(그림 4)을 이용하여 모의하였다.

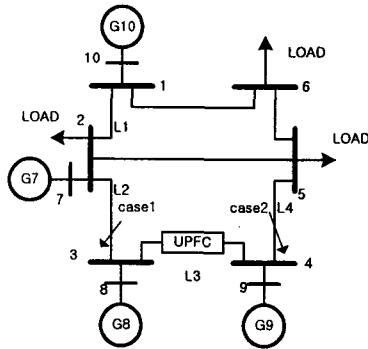


그림 4 IEEE 과도안정도 Test 모델

사고는 UPFC 주변선로의 3상 지락사고로 하였고, 사고선로를 제거하는 것으로 고장제거 후의 계통을 구성하였다. GA적용시에 개체수는 100, 돌연변이 확률 0.1, 교차확률 0.4로 하였다. 그림 5는 L2번 선로 고장시 L3선로에 직렬전압원을 삽입하였을 때, 전압크기 보상율과 위상각의 변화에 따라 L3선로의 송전용량이 변화됨을 보여주고 있다.

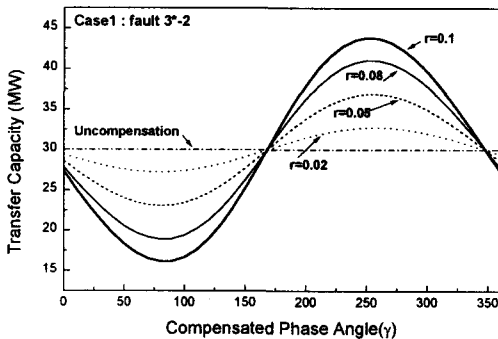


그림 5 UPFC 설치선로의 송전용량의 변화

그림 6은 L2선로의 고장시 UPFC동작에 의해 L3의 송전용량이 변화됨으로써 계통의 임계에너지에 미치는 영향을 보여주고 있다.

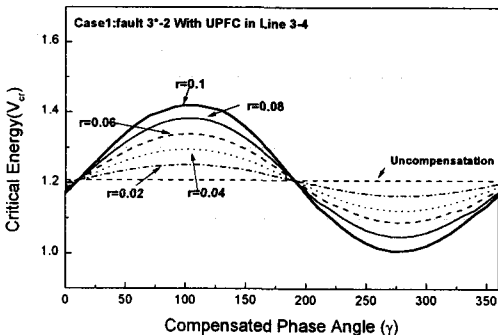


그림 6 직렬전압원의 제어량에 따른 임계에너지의 증감

그림 7은 계통의 일정한 에너지마진 유지를 위해 유전 알고리즘을 사용하였을 때, 유전알고리즘의 수렴도와 임

계에너지의 변화, 그리고 에너지마진의 변화를 보여준다.

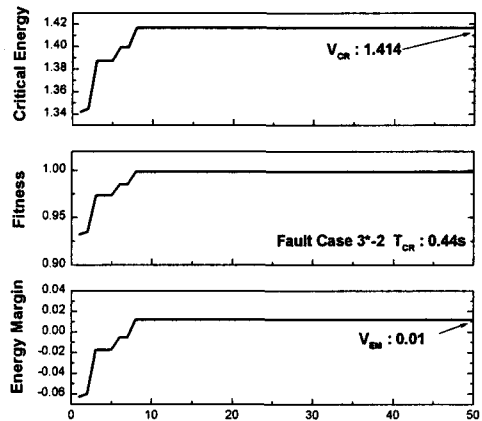


그림 7 유전알고리즘 수행결과

표 1은 사고 사례에 따라 GA로 결정한 전압크기 보상율과 위상각이다. 이때 에너지마진의 기대치는 0.01이다.

[표 1] GA를 이용한 UPFC의 제어량 산정의 결과

고장 선로	고장제거 시간 (s)	과도 에너지 V_{TR}	UPFC 제어전 V_{CR}	UPFC 제어후 V_{CR}	보상된 임계 에너지량	전압크기 보상율 (r)	위상각 (Degree)
L2	0.42	1.259	1.03	1.269	0.23	0.059	163.42
L2	0.44	1.404	1.03	1.414	0.38	0.097	99.58
L4	0.48	1.412	1.29	1.422	0.13	0.017	313.98
L4	0.50	1.567	1.29	1.577	0.28	0.090	246.82

3. 결 론

본 논문은 에너지마진과 과도안정도 향상을 위한 UPFC의 적정 제어량을 유전알고리즘을 이용하여 결정하였다. 과도에너지 함수에 있어서 UPFC의 제어효과를 평가하기 위해 직렬전압원으로서의 UPFC 모델을 이용하였다. UPFC의 동작후, 계통의 임계에너지가 증대됨을 입증하기 위해 UPFC의 제어량을 UPFC가 설치된 선로의 양끝모선에 병렬로 연결된 어드미턴스 값으로 환산하였다. 제안된 알고리즘을 과도안정도 모의 계통에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] L Gyugyi, "A Unified Power Flow Control concept for Flexible AC transmission Systems" Westinghouse Electric Corporation, U S A
- [2] M. Noroozian, L. Angquist, M. Ghandhari and G. Andersson, "Use of UPFC for Optimal Power Flow Control", *IEEE Transactions on power Delivery*, Vol. 12, No. 4, October 1997
- [3] 유석구, 문병서, 김규호, "가변 직렬콘덴서를 이용한 과도안정도 향상을 위한 유전 알고리즘 응용," *전기학회 논문지*, pp. 38-45, 1997년, 1월호.
- [4] A. A. Fouad, Vijay Vittal, "Power System Transient Stability Analysis Using the Transient Energy Function Method", Prentice-Hall, 1992.
- [5] Z. Michakewicz, "Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs", 2nd, Springer Verlag, 1992