다목적 유전자 알고리즘을 이용한 SVC와 외부 리액터/커패시터 뱅크의 협조 제어

박종영* 이상호* 박종근** 손광명*** 이송근***
서울대학교 동의대학교 전주대학교

Coordination of SVC and External Reactor/Capacitor Banks Using Multi-objecit

Jong-young Park* Sang-ho Lee* Jong-keun Park** Kwang-myoung Son*** Song-keun
Seoul National Univ. Dong-Eui Univ. Jeonju Univ.

Abstract - SVC(Static Var Compensator) is commonly installed with conventional mechanically switched existing reactor or capacitor banks for wide range voltage control. The frequencies of switching of external banks have a great impact on the quality of voltage, but is limited since the life time of the external banks depends severely on the number of switching. So it is a complete multi-objective nonlinear optimization problem with conflicting objectives. This paper presents a method to determine the optimal coordination of SVC and external banks using genetic algorithm based on the multi-objective criteria. Optimal dead band and delay time of external banks is sought for reliable and efficient operation

1. 서론

전압 품질 향상을 위해 SVC와 외부 무효전력 보상 뱅크들을 협조 제어하므로써, SVC의 운전여유를 확보할 수 있다. 지연시간과 불감대와 같은 비선형 특성이 있다는 점에서 외부 뱅크의 동작은 ULTC의 동작과 비슷한 점이 있다. ULTC 동작의 제어에는 퍼지로직이 적용되었다[1]. 외부뱅크의 제어방법에도 AI 기술이 적용될 수 있다.

이 논문에서 제시하는 바는 다음과 같다. 배전단에서 SVC와 외부뱅크는 전압의 제어라는 같은 목적을 가지고 있다. 그에 반해 두 기기는 전혀 다른 타임 스케일을 가지고 있다. SVC는 몇 밀리세컨드의 매우 빠른 동작을 보이고, 외부 뱅크는 수 초에서 수 분 사이의 느린 동작을 하게 된다. 따라서 SVC와 ULTC의 협조제어의 경우[3]와 같이, SVC와 외부뱅크의 협조 제어를 통해 전압 품질을 향상시킬 수 있을 것이다.

SVC와 외부 뱅크의 협조 제어에 있어서 서로 상충하는 여러 가지의 목적 함수가 존재한다. 예를 들어 SVC의 운전 여유와 뱅크의 몽작횟수는 상충하는 목적함수이다. 이 때 그것들의 절충된 해를 구하기 위하여 다목적 퍼지 목적함수가 적용될 수 있다. 최적해는 유전자 알고리즘을 통해 구하였다.

이 논문에서는 SVC와 외부 뱅크들의 제어 변수들을 조절해서, SVC의 운전 여유를 확보하고, SVC와 외부 뱅크의 손실을 줄였으며, 부하단의 전압 품질을 향상시켰다.

2. 계통의 모델링

2.1 SVC 모델링

SVC의 특성은 Task force of CIGRE[2]에 요약되어 있고, 그것의 모델링은 IEEE special Stability Con Working Group[4]에 제시되어 있다.

SVC의 동작은 외부 뱅크의 동작과 비교해 볼 때 매우 빠르기 때문에 SVC의 동적 특성은 무시되었다. SVC는 다음 식과 같이 모델링 되었다.

● 제어 범위 내 ($B_{\min} \le B_{SVC} \le B_{\max}$)

$$V = V_{ref} - X_{SL} I_{SVC} \quad (1)$$

● 커패시터 한계 ($B_{SVC} < B_{\min}$)

$$B = B_{\min} \quad (2)$$

● 인덕티브 한계 ($B_{SVC} > B_{\max}$)

$$B = B_{\max} \quad (3)$$

여기에서

V_{ref} : SVC의 기준 전압

X_{SL} : 제어계 특성 리액턴스

2.2 외부 뱅크의 제어

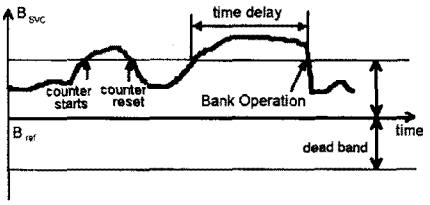

그림 1. 외부 뱅크의 동작

외부뱅크는 그림1.에서와 같이 동작한다.

SVC의 서셉턴스가 미리 정해놓은 수치 밖으로 벗어나면 커패시터 뱅크나 인덕터 뱅크가 동작하게 된다. 이에 대한 이산함수 식은 다음과 같다.

$$n(t+1) = n(t) + f(e(t), \tau(t)) \quad (4)$$

$$\tau(t+1) = g(e(t), \tau(t)) \quad (5)$$

$$f(e,\tau) = \begin{cases} 1 & if\ e > \varepsilon\ and\ \tau > T_d \\ -1 & if\ e < \varepsilon\ and\ \tau < -T_d \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$g(e,\tau) = \begin{cases} 1 & if\ e > \varepsilon\ and\ \tau \ge 0 \\ -1 & if\ e < \varepsilon\ and\ \tau \le 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

$$e = B_{SVC} - B_{ref} \quad (8)$$

식 (4)~(8)에서 뱅크는 SVC의 서셉턴스가 기준값에 지연시간 이상 불감대 밖으로 벗어나 있을 때 동작함을 볼 수 있다.

3. 다목적 퍼지 최적화

여러 개의 상충하는 목적함수들이 있을 때 퍼지 목적함수를 이용해 절충해를 찾을 수 있다. 다목적 최적화 문제는 다음과 같이 정식화 할 수 있다.

$$\text{minimize } (z_1(x), z_2(x), \cdots, z_k(x))^T \quad (9)$$
$$\text{subject to } Ax \le b$$

여기에서

$x = (x_1, \cdots, x_n)^T$

$b = (b_1, \cdots, b_n)^T$

$A = (a_{ij})$: $m \times n$ matrix

이 때 각 목적함수 $z_i(x)$에 대해 퍼지 목적 함수를 세울 수 있다. 각 목적 함수에 대해 결정자가 받아들일 수 있는 목적함수의 가장 좋지 않은 값 z_i^0와, 주어진 조건에서 얻을 수 있는 가장 좋은 값 z_i^1을 정하면 다음과 같이 선형 멤버쉽 함수 $\mu_i(z_i(x))$를 잡을 수 있다.

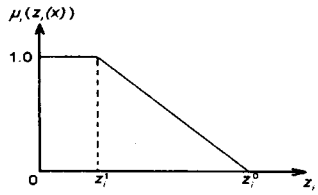

그림 2. 선형 퍼지 멤버쉽 함수

$$\mu_i(z_i(x)) = \begin{cases} 1 & ; \quad z_i(x) \le z_i^1 \\ \dfrac{z_i(x) - z_i^0}{z_i^1 - z_i^0} & ; \quad z_i^1 \le z_i(x) \le z_i^0 \\ 0 & ; \quad z_i(x) \ge z_i^0 \end{cases} \quad (10)$$

z_i^0, z_i^1를 정하는 방법들 중에서 한가지는 다음과 같다. 우선 목적함수 각각에 대해 최소값 $z_i^{\min}$을 찾은 다음 다음 식과 같이 $z_i^{\max}$를 잡는 것이다.

$$z_i^{\min} = z_i(x^{i0}) = \min\{z_i(x) | Ax < b\} \quad (11)$$

$$z_i^{\max} = \max(z_i(x^{10}), \cdots, z_i(x^{i-1,0}), z_i(x^{i+1,0}), \cdots, z_i(x^{k0})) \quad (12)$$

이 때 벨만의 퍼지연산을 사용하면 각 목적함수 (10)의 교집합을 다음과 같이 잡을 수 있다.

$$\mu_D(\mu(z(x))) = \min(\mu_1(z_1(x)), \cdots, \mu_k(z_k(x))) \quad (13)$$

그러면 (9)의 다목적 최적화 문제는 다음과 같이 정식화 될 수 있다.

$$\text{maximize} \quad \min \mu_i(z_i(x)) \quad (14)$$
$$\text{subject to} \quad Ax \le b$$

4. 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘은 확률적 방법의 하나로서, 글로벌한 최적값을 찾을 때 많이 사용된다. 기본 아이디어는 멘델의 '우성유전의 법칙'으로서 가장 적합한 개체들이 다음 세대로 유전되게 된다. 다음 세대로 유전되는 과정에서 교배와 돌연변이가 일어나게 된다. 이 과정이 여러 세대를 거치는 동한 적합한 해가 찾아지게 된다.

SVC와 뱅크의 협조제어에서는 여러 번의 시도를 통해 최적의 제어 변수들을 찾게 된다. 이 방법은 조류계산을 연속적으로 여러 번 해야하기 때문에 많은 시간이 필요하다.

5. 문제의 정식화

5.1 대상계통

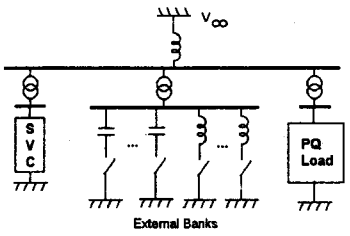

그림 3. 대상 계통

그림 3.의 계통에 대해 최적화를 시행한다. 이 계통은 변전소에 연결된 배전계통으로서 무한모선이 변전소의 역할을 하게된다. 외부 뱅크는 SVC의 서셉턴스 값을 기준으로 동작하게 된다.

5.2 제안된 다목적 최적화

목적함수는 다음과 같다.

1. 뱅크와 SVC 손실의 합
2. 뱅크의 동작횟수
3. SVC의 운전여유
4. 부하단 전압의 전압 변화

뱅크와 SVC의 손실은 무효전력 출력의 5%로 하였다.

손실의 하루 동안의 rms 값은 다음과 같이 계산하였다.

$$L_{rms} = \sum_{k=1}^{N} \sqrt{\frac{1}{N} L_k(x, t(k))^2} \quad (15)$$

여기에서

N : 모의 시 하루동안의 샘플링 횟수

t : 시간

L_k: k번째 모의 시 손실

L_{rms}: 하루 손실의 rms값

SVC의 운전여유와 부하단의 전압 변동은 다음과 같이 계산되었다.

$$M_{rms} = \sum_{k=1}^{N} \sqrt{\left\{\frac{1}{N} \min(|B_{SVC}(x, t(k)) - B_{\max}|, |B_{SVC}(x, t(k)) - B_{\min}|)\right\}^2} \quad (16)$$

여기에서

M_{rms} : 하루 동안의 SVC 운전여유의 rms값

B_{SVC} : 시간 t 에서의 SVC의 서셉턴스

$$D_{rms} = \sum_{k=1}^{N} \sqrt{\left\{\frac{1}{N} \min(|V_{Load}(x, t(k)) - V_{\max}|, |V_{Load}(x, t(k)) - V_{\min}|)\right\}^2} \quad (17)$$

여기에서

D_{rms} : 하루 동안 부하버스 전압 변동량의 rms값

V_{Load} : 시간 t에서의 부하버스의 전압

이 경우에 다음과 같이 목적함수를 잡았다.

$$\mu_i(z_i(x)) = \begin{cases} 1 & ; \quad z_i(x) \le z_i^1 \\ \dfrac{z_i^{\max} - z_i(x)}{z_i^{\max} - z_i^{\min}} & ; \quad z_i^1 \le z_i(x) \le z_i^0 \\ 0 & ; \quad z_i(x) \ge z_i^0 \end{cases} \quad (18)$$

여기에서 i = 1, 2, 3, 4

위와 같을 때 다음 식을 유전자 알고리즘을 통하여 최적화를 시행하였다.

maximize $\min(\mu_1(z_1(x)), \mu_2(z_2(x)), \mu_3(z_3(x)), \mu_4(z_4(x)))$ (20)

표1. 외부뱅크 설치

	용량	개수
커패시터 뱅크	0.1 var pu	5
인덕터 뱅크	0.1 var pu	5

6. 모의 결과

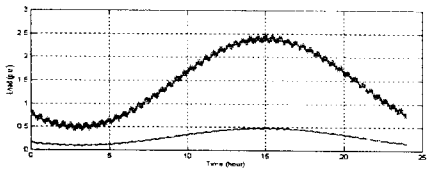

그림 4. 하루 동안의 부하량의 변화

계통 동작이 향상됨을 보이기 위해 그림 3.의 계통이

표2. 제어변수의 범위

	최소값	최대값
지연시간	3 분	18 분
불감대	0.1 var pu	0.55 var pu

모의 되었다.

SVC의 서셉턴스 값의 범위는 다음과 같이 잡았다.

$B_{min} = -0.6$ p.u. $B_{max} = 0.6$ p.u.

외부 뱅크는 표1.과 같이 설치하였다.

표3. 목적함수의 최소값, 최대값

i	$z_i(x)$	z_i^{max}	z_i^{min}
1	뱅크와 SVC 손실의 합	0.05538	0.04361
2	뱅크의 동작회수	21	18
3	SVC의 운전여유	0.4864	0.2698
4	부하단의 전압변동	9.467×10^{-3}	3.136×10^{-3}

하루 동안의 부하변화는 그림4.와 같다고 하였다.

제어 변수의 범위는 표2.와 같다.

이 범위에서 각 목적함수의 최대값(z_i^{max})과 최소값

표4. 사례 연구

	지연시간	불감대
경우1(최적해)	5분	0.3625
경우2	5분	0.4000
경우3	7분	0.3625

(z_i^{min})은 표3.과 같았다.

위와 같은 상황에서 표4.의 세 가지 경우에 대해 모의해보았다. 이 중에서 경우1이 제안된 알고리즘에 의해 구해진 최적해이다. 경우2는 불감대를 변화시켜 보았고 경우3은 지연시간을 변화시켜 보았다.

표5.에서 알 수 있듯이 경우1의 경우 큰 운전여유와 작은 손실을 보이고 있다. 경우2, 경우3과 비교해 보면 알수 있듯이 뱅크 동작의 증가 없이, 계통의 동작이 향상되었음을 알 수 있다. 충분한 SVC의 운전여유가 뱅크와의 협조제어를 통해 확보되고 있다.

지연시간이나 불감대를 크게 하는 경우 외부뱅크의 동작횟수는 감소하였으나, SVC의 운전여유가 줄어들고 극한 경우에는 SVC가 용량한계에 도달해 전압 품질이 급

표5. 모의 결과

		경우1	경우2	경우3
손실 (var pu)	z_1	0.05355	0.05455	0.05442
	μ_1	0.3407	0.2778	0.2864
동작횟수	z_2	17	16	17
	μ_2	1.0000	1.0000	1.0000
SVC운전 여유 (var pu)	z_3	0.3462	0.3336	0.3340
	μ_3	0.3610	0.3049	0.3069
전압변동 (mV pu)	z_4	3.9026	3.9892	3.9555
	μ_4	0.8746	0.8611	0.8663

격히 나빠졌다. 그 반대의 경우에는 SVC의 운전여유는 많이 확보할 수 있었지만, 뱅크의 필요 없는 동작이 나타났고, 손실도 증가하는 경향을 보였다.

7. 결론

이 논문에서는 배전계통에서 외부뱅크를 SVC의 서셉턴스 값을 기준으로 동작하게 하였다. 이렇게 함으로써 상정사고시 SVC의 운전여유를 확보하고 부하 버스의 전압품질을 향상시킬 수 있었다. 제안된 방법에 의한 최적화를 통해서 뱅크의 동작횟수의 증가 없이 위 목적을 만족시킬 수 있었다.

서로 상충하는 두 개 이상의 목적함수가 있을 경우, 운영자는 다목적 유전 알고리즘을 이용하여 절충된 해를 구할 수 있을 것이다. 또한 각 목적함수가 서로 비교하기 어려운 경우에도, 퍼지 목적함수의 스케일링 효과로 인해 서로 비교가 가능하게 된다. 이 논문에서는 퍼지 멤버쉽 함수의 교집합으로 미니멈 연산자를 사용하였는데, 이렇게 함으로써 동작의 최저치를 높임으로써 상정사고 시의 안정성 확보를 하였다. 전력 계통처럼 그 복잡성으로 인해 해석적으로 분석하기가 어려운 경우에는 제어변수의 변화에 대한 계통값들의 변화도 분석 가능할 것이다.

[참 고 문 헌]

[1] B. Kasztenny, E. Rosolowski, J. Izykowski, M. M B. Hillstrom, "Fuzzy Logic Controller for On-Transformer Tap Changer", *IEEE Trans. On P Delivery*, Vol. 13, No.1, pp.164-2170, 1998.1.

[2] CIGRE Working Group 38-01: Task Force No Static Var Compensators, Static Var Compensators

[3] J. J. Paserba, D. J. Leonard, N W. Miller, Naumann, M. G. Lauby, F. P. Sener, "Coordinati Distribution Level Continuously Controlled Compe with Existing Substation Equipment for Long VAR Management", *IEEE Trans. On Power Deliv* Vol.7, No.2, pp. 1034-1040, 1994. 4

[4] IEEE Special Stability Controls Working Group, Var Compensator Models for Power Flow and Dyn Performance Simulation", *IEEE Trans. on P Systems*, Vol. 9, No.1, pp.229-240, 1994.2.

[5] John J. Paserba, Daniel J. Leonard, Steven T. n "Coordination of a Distribution Level Continu Controlled Compensation Device with Existing Sub Equipment for Long Term Var Management", *I Trans. on Power Delivery*, Vol.9, No.2, pp. 103 April 1994

[6] K.M. Son, K.S. Moon, S.K. Lee, J.K. Park, "Coor of SVC with a ULTC Reserving Compensation M for Emergency Control"

[7] Masatoshi Sakawa, *Fuzzy Sets and Inter Multiobjective Optimization*, Plenum Press, 1993.

[8] Masatoshi Sakawa, Fuzzy Evolutionary Comp edited by Witold Pedrycz, Kluwer, 1997.