

전력계통의 안정도 향상을 위한 유전알고리즘을 이용한 TCSC 안정화장치 설계

정문규* · 정형환* · 허동렬* · 주석민** · 정동일*
 *동아대학교 전기공학과 **창원대학교 메카트로닉스공학부

Design of TCSC-PSS using Genetic Algorithm
 for Enhancement of Power System Stability

Mun-Kyu Chung* · Hyeong-Hwan Chung* · Dong-Ryol Hur* · Seok-Min Joo** · Dong-Il Chung*
 *Dept. of Electrical Eng., Dong-A Univ. **Dept. of Mechatronics Eng., Chang-Won Univ.

Abstract - In this paper, we design a Power System Stabilizer for a Thyristor Controlled Series Capacitor(TCSC-PSS) for enhancement of power system stability. Here, PSS parameters are optimized using Genetic Algorithm(GA) in order to maintain optimal operation of TCSC. Simulation results show that the proposed control technique is superior to a conventional PSS in dynamic responses over the wide range of operating conditions and is convinced robustness and reliableness in view of structure.

1. 서 론

전력계통의 유연성과 제어성능을 향상시킴으로써 운전 효율과 신뢰도를 극대화하기 위한 방안으로 유연송전시스템(Flexible AC Transmission System, FACTS) 기술이 개발되었다. FACTS 소자의 일환으로서 선로의 임피던스를 변경하기 위해 직렬 커패시터(Series Capacitor)가 사용되었으며, 모선의 전압을 유지하기 위해 전력용 콘덴서(Shunt Capacitor)가 사용되었다. 이후, 고정된 기계적인 스위칭에서 싸이리스터 스위칭으로 대체함으로써 한층 더 발전된 싸이리스터 제어 직렬 보상기(Thyristor Controlled Series Capacitor, TCSC)와 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator, SVC)의 실용화가 되고 있다.

본 논문에서 적용한 TCSC는 TCR(Thyristor Controlled Reactor)과 커패시터의 병렬구조로 이루어져 있다. TCSC는 정상상태에서의 전력조류 극대화 및 제어기능과 함께 외란에 의한 과도시에 보조제어기를 부착함으로써 전력계통 안정도 향상을 수행할 수 있다. 또한 기존의 기계적 스위칭에 의한 직렬 보상기가 내포하고 있는 저주파 공진 방지기능과 커패시터 보호 및 재투입 기능을 부여할 수 있다[1,2].

그러나 TCSC등과 같은 FACTS 기기만으로는 전력 수요 증가에 따른 저주파 진동현상 및 경부하 심야운전 중의 전압상승등 계통 안정도 문제를 완벽히 해결할 수 없다. 이를 위해 전압 오차신호에 발전기의 속도, 주파수, 또는 전력등의 과도신호를 이용하여 추가적인 신호를 입력함으로써 실용적이며 효과적으로 동요를 억제할 수 있음이 알려져 있다. 이러한 전력계통의 저주파 진동을 억제하고 계통의 안정도 특성을 향상시키기 위한 장치의 일환인 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer, PSS)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[3,4]. 그러나 기존의 PSS는 그 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하여 설계자의 경험 및 시행착오에 의해서 설계되었으며, 이의 사용에 고도의 전문성이 요구된다. 이러한 문제의 해결책으로 본 논문에서는 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 이용하고자 한다[5]. GA는 문제를 나타내는 탐색공간에서 가능성 있는 후보해들에 대해 자연의 적자생존과 개체선택방법을 모방하여 유

전연산을 적용시켜 해들을 진화시킴으로써 최적해를 찾는 탐색 알고리즘이다.

따라서 본 논문에서는 전력계통의 안정도 향상을 위해 GA를 이용한 TCSC 안정화장치(TCSC-PSS)를 설계하고자 한다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모선에 적용한 결과를 다양한 외란이 발생하였을 경우에 대하여 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 고찰하고자 한다.

2. 전력계통의 수학적 모델

그림 1은 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 전력계통의 블록선도이다. TCSC는 전력의 흐름을 조절하기 위하여 전송선로에 직렬로 연결되어 있다. 그러므로 TCSC는 저주파 진동에 부가적인 댐핑을 제공할 수 있으며, 또한 전력전송 능력을 향상시킬 수 있다. TCSC는 TCR과 고정된 커패시터가 병렬로 연결된 구조로 이루어져 있으며 싸이리스터의 점호각을 제어함으로써 선로 임피던스를 조절할 수 있다.

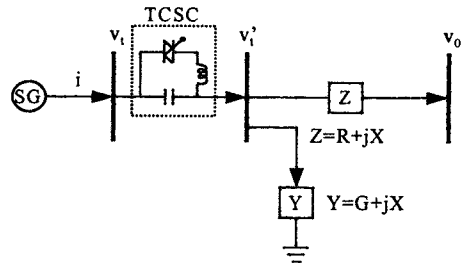


그림 1 TCSC를 포함한 1기 무한대 모선 전력계통

TCSC의 구조는 Open loop 임피던스 입력이 장착되어 있고, 부가적으로 제어장치를 부착할 수 있도록 보조 입력을 가지고 있다. 정상상태에서 선로조류제어를 위하여 임피던스 지정치로 운전되며, 외란에 의한 과도상태에서는 보조입력 신호를 제어함으로써 안정도를 개선할 수 있다. 제어기로부터 입력되는 임피던스 신호는 이 임피던스를 구현하는 점호각으로 변환된다. 이로부터 싸이리스터의 점호각 제어를 통하여 목표 임피던스로 전이되는 동안에 약간의 시 지연이 발생한다. 이러한 시 지연은 전력계통 안정도해석에서 다음과 같은 1차 지연 요소로 고려할 수 있고, 그 블록선도는 그림 2와 같다. 이를 상태방정식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

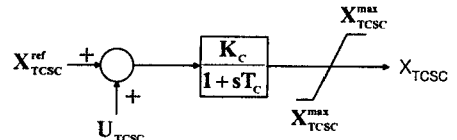


그림 2 TCSC 모델의 블록선도

$$\dot{X}_{TCSC} = \frac{K_C}{T_C} (X_{TCSC}^{ref} + U_{TCSC} - X_{TCSC}) \quad X_{TCSC}^{min} \leq X_{TCSC} \leq X_{TCSC}^{max} \quad (1)$$

여기서, X_{TCSC} : TCSC의 임피던스(p.u.)
 T_C : TCSC의 시정수
 K_C : TCSC의 이득
 X_{TCSC}^{ref} : 정상운전시 기준임피던스 입력신호
 U_{TCSC} : 제어입력
 $X_{TCSC}^{max}, X_{TCSC}^{min}$: TCSC 용량의 상·하한치

3. GA를 이용한 TCSC-PSS 설계

전력계통의 안정도 향상을 위해 본 논문에서 제안하는 TCSC-PSS의 블록선도는 그림 3과 같다. 여기서, PSS의 각 구성요소를 최적화하기 위해 GA를 이용하였으며, 최적화하고자 하는 파라미터는 K_C, T_w, T_1, T_2 이다.

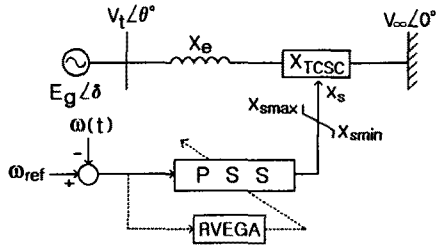


그림 3 제안된 GA를 이용한 TCSC-PSS

string 1	K_C	T_w	T_1	T_2
string 2	K_C	T_w	T_1	T_2
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
string n	K_C	T_w	T_1	T_2

그림 4 제안된 염색체의 구조

그림 4는 PSS를 최적화하기 위한 염색체 구조이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하였다. 각 개체의 적합도를 평가하는 적합도함수는 보통 풀고자하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가함수에 의해 결정된다. 일반적으로 PSS의 최적화는 평가함수값을 최소화시키는 PSS의 구성요소를 찾아내는 것이다. 따라서 본 논문에서 사용된 평가함수는 식 (2)와 같고, 적합도 함수는 식 (3)과 같이 정의하였다.

$$J = \int_0^{t_1} (\alpha|\Delta\omega| + \beta|\Delta V_1| + \gamma|\Delta X_{TCSC}|) dt \quad (2)$$

$$\text{Fitness}(J) = \frac{1}{1 + \min J} \quad (3)$$

식 (2)에서 t_1 은 적분시간이며, α, β, γ 는 가중치이다. 식 (3)의 적합도함수는 PSS가 목표값에 빨리 도달하고, 정상상태 오차가 최소가 될 때, 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의되어진 적합도함수는 각 개체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 되며, 이 적합도가 큰 개체는 다음 세대에 생존할 가능성이 크게 되며 이와 반대로 적합도가 작은 개체는 생존할 가능성이 작게 된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 전력계통의 안정도 향상을 위해 GA를 이용한 TCSC-PSS를 설계하였다. 제안한 TCSC-PSS의 외란 억제능과 강인성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모선계통에 대해 다양한 부하변동이 발생한 경우에

대하여 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어기 설계방식에 의한 PSS[3]와 동특성을 비교, 고찰하였다.

본 논문에서 사용한 동기기, 여자기 및 선로정수와 계통의 초기상태는 표 1과 같다.

표 1 계통 파라미터

발전기 정수	$M = 10.0(\text{p.u.})$ $T_{d0}' = 6.0(\text{p.u.})$ $X_{d}' = 0.32(\text{p.u.})$	$D = 0.0(\text{p.u.})$ $X_d = 1.6(\text{p.u.})$ $X_q = 1.55(\text{p.u.})$
여자기 정수	$K_A = 25.0(\text{p.u.})$	$T_A = 0.05(\text{p.u.})$
선로 정수	$R = -0.034(\text{p.u.})$ $G = 0.249(\text{p.u.})$	$X = 0.997(\text{p.u.})$ $B = 0.262(\text{p.u.})$
초기 상태	$P_{e0} = 1.0(\text{p.u.})$ $V_{t0} = 1.0(\text{p.u.})$	$Q_{e0} = 0.015(\text{p.u.})$

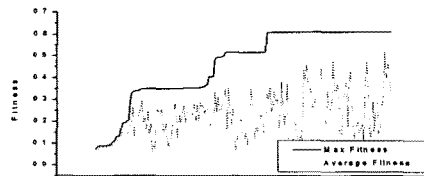
4.1 정상 부하시

제안한 설계기법의 강인성을 평가하기 위해서 정상부하시 ($P_{e0}=1.0(\text{p.u.}), Q_{e0}=0.015(\text{p.u.})$) 외란으로서 회전자각 증가가 발생한 경우에 대하여 TCSC-PSS를 설계하였다. GA의 초기 파라미터는 표 2와 같고, 각 세대에 따른 최대적합도와 평균적합도는 그림 5의 (a)와 같으며, 평가함수가 최소화되고 있는 과정을 그림 5의 (b)에서 보여주고 있다. 이 그림에서는 최적값을 찾기 위해 전역적 탐색을 수행하고 있음을 보여주고 있으며, 약 50세대 이후에는 최적값에 수렴하고 있음을 알 수 있다.

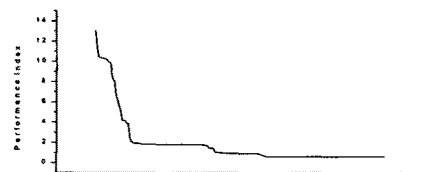
정상부하시 종래의 PSS와 제안된 TCSC-PSS에 대한 동특성 응답은 그림 6과 같다. 발전기 각속도 편차 $\Delta\omega$ 와 회전자각 편차 $\Delta\delta$ 의 응답특성에서 제안된 TCSC-PSS가 저주파 진동을 매우 빨리 감쇠시킴을 볼 수 있다. 또한 단자전압 편차 ΔV_1 의 응답특성에서도 종래의 PSS보다 정정시간면에서 우수한 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 2 초기 파라미터

Parameters	Values
Population size	20
Number of generation	200
Crossover rate	0.85
Mutation rate	0.01

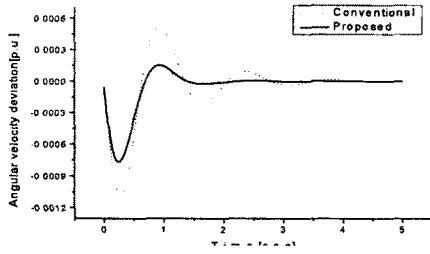


(a) Max and average fitness

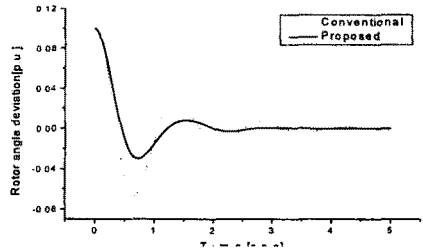


(b) Performance index

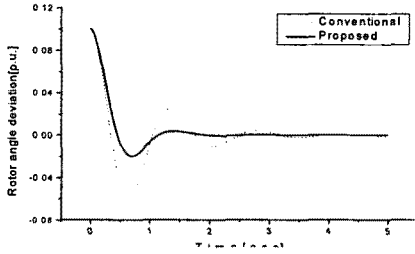
그림 5 적합도와 평가함수



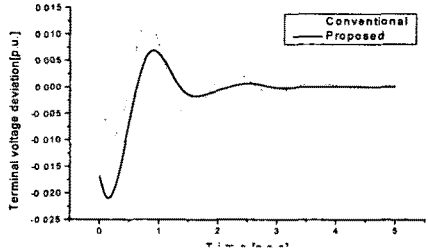
(a) 발전기 각속도 편차 $\Delta\omega$



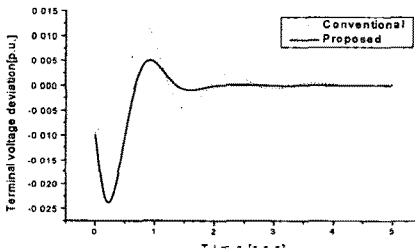
(b) 발전기 회전자각 편차 $\Delta\delta$



(b) 발전기 회전자각 편차 $\Delta\delta$



(c) 단자전압 편차 ΔV_t



(c) 단자전압 편차 ΔV_t

그림 7 중부하시 전력계통의 동특성 응답
($\Delta P_{e0}=1.3(\text{p.u.})$, $\Delta Q_{e0}=0.015(\text{p.u.})$)

3. 결 론

본 논문에서는 FACTS 설비의 일종인 전력조류 극대화 및 제어기능과 함께 외란에 의한 과도시의 전력계통 안정화 기능을 수행할 수 있는 TCSC 안정화장치 설계에 대하여 연구하였다. 또한 제어기 파라미터 설정시 기존의 일반적인 방법인 경험 및 시행착오에 의존하는 반복수행과는 달리, 복잡한 수식이 필요 없고 계산시간을 감소시키며 적은 반복횟수로도 최적해를 찾을 수 있는 자연 생태계의 진화를 모의한 유전알고리즘을 이용하여 설계하였다. 제안한 기법의 타당성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선에 적용하여 다양한 부하외란에 적용하였다. 정상 부하시 및 중 부하시의 사례연구를 통하여 제안된 제어기법이 전력계통 안정화에 효과적임을 알 수 있었고, 또한 강인성을 검증하였다.

현재, 본 논문의 기본기법을 바탕으로 비선형 시뮬레이션에 대한 연구를 수행하고 있으며, 퍼지, 신경회로망, 유전알고리즘과 이들의 하이브리드형 설계에 관한 체계적인 비교, 고찰에 관한 연구를 수행중에 있다.

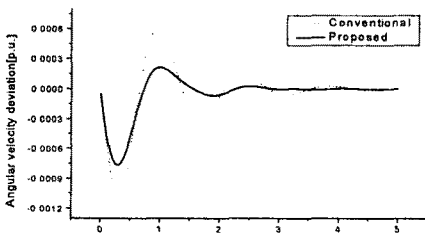
(참 고 문 헌)

- [1] J. J. Paserba, N. W. Miller, E. V. Larsen, R. J. Piwko, "A Thyristor Controlled Series Compensation Model for Power System Stability Analysis", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 10, pp. 1471-1478, 1995.
- [2] 한전전력연구원, "FACTS 계통운용 기술개발 연구", 1999.
- [3] Y. N. Yu, "Electric Power System Dynamics", Academic Press, 1983.
- [4] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers and M. S. Zywno, "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 2, 1989.
- [5] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989.

그림 6 정상부하시 전력계통의 동특성 응답
($\Delta P_{e0}=1.0(\text{p.u.})$, $\Delta Q_{e0}=0.015(\text{p.u.})$)

4.2 중 부하시

부하조건 변화로 유효전력 $P_{e0}=1.0(\text{p.u.})$ 에서 $P_{e0}=1.3(\text{p.u.})$ 로 30%증가한 중부하시 발전기 회전자각 편차 $\Delta\delta$ 의 초기치를 $0.1(\text{p.u.})$ 변화시킨 경우로 시스템 운용조건을 설정하였다. 그림 7에서 발전기 각속도 편차 $\Delta\omega$, 회전자각 편차 $\Delta\delta$ 및 단자전압 편차 ΔV_t 의 응답 특성에서 제안한 TCSC-PSS가 종래의 PSS보다 성능이 우수한 동특성을 보이고 있다. 따라서 제안된 제어장치는 폭넓은 범위상에서도 전력계통 안정화에 매우 효과적임을 알 수 있었다.



(a) 발전기 각속도 편차 $\Delta\omega$