

송전 전력 제어를 위한 분산 정지형 직렬 보상기의 무효전력 주입 기법

윤한중, 이태영, 조영훈
 건국대학교 전력전자연구소

Algorithm of reactive power injection on Distributed Static Series Compensator

Hanjong Yoon, Taeyoung Lee, Younghoon Cho
 Power Electronics Lab., Konkuk Univ.

ABSTRACT

Distributed Flexible AC Transmission System(D FACTS) was proposed as a solution for weakness of FACTS devices. The D FACTS device DSSC(Distributed Static Series Compensator) can provide controllable reactance compensation in transmission line such as SSSC(Static Synchronous Series Compensator). This paper introduce the algorithm of reactive power injection on DSSC and propose the method of current balancing by reactive power injection. The proposed algorithm has been verified with simulation and experiment results.

1. 서론

유연송전시스템(FACTS, Flexible AC Transmission System)은 기존 전력계통망에 전력변환장치를 결합하여 전력계통의 전력수송능력과 설비이용률을 높이는 시스템이다. 전력계통의 확충 없이 전력계통의 성능을 향상시킬 수 있어 세계적으로 FACTS에 대한 연구가 활발히 진행되었으며, 국내에서도 80~200MVA급 FACTS 설비를 운용하고 있다. 하지만 대규모, 대용량의 FACTS 설비는 막대한 초기투자비용, 큰 부지 확보, 어려운 설비 유지보수 등으로 인해 FACTS 설비의 보급 및 확산이 어려운 실정이다. 이러한 FACTS의 단점을 해소할 수 있는 대안으로 소형, 저전력의 전력전자회로로 구성된 장치를 선로에 다수 매달아 직렬형 FACTS 설비와 유사한 기능을 하는 분산형 유연송전시스템(Distributed FACTS)이 제안되었다.^[1] 그러나 현재까지도 D FACTS에 관한 연구는 세계적으로 거의 진행되지 않았으며, 특히 인버터 토폴로지와 제어 알고리즘에 대해 부족함이 많다.

2. DSSC의 무효전력 주입기법

2.1 DSSC의 전력 보상 원리

분산 정지형 직렬 보상기(DSSC, Distributed Static Series Compensator)는 직류링크 커패시터, 전압형 인버터, LC필터, 변압기로 구성되는 장치로 변압기를 통해 선로에 직렬 연결되어 선로 리액턴스 성분을 조절하는 보상기이다. 인버터가 합성한 전압을 선로에 주입함으로써 선로의 리액턴스 성분을 조절해 송전 전력을 제어할 수 있다. 이때 인버터가 주입하는 교류 전압의 크기는 직류링크 커패시터에 걸리는 전압의 크기와 같고, 위상은 선로전류 위상의 $\pm 90^\circ$ 이다. 리액턴스 성분만 있는 선로에서 교류전압을 입력하면 전압과 전류의 위상차는 항상 $\pm 90^\circ$ 가 된다. 여기에 선로전류 위상의 $\pm 90^\circ$ 인 교류전압을 직렬로 삽입(주입)하면 입력전압과 동상 혹은 역상 전압이 걸리는 것과 같으며, 주입한 전압이 선로전류 위상의 $+90^\circ$ 이면 입력전압의 크기는 감소하고 -90° 이면 입력전압의 크기는 증가하면서 송전 전력의 크기가 변한다. 인버터 주입 전압은 항상 선로전류 위상의 $\pm 90^\circ$ 이므로 본 논문에서는 직축전압(Quadrature voltage)이라 정의한다. 직축전압(V_q)은 선로전류(i_l)를 이용하여 식(1)과 같이 리액턴스(X_q)로 등가 할 수 있다.^[2] 위상이 $+90^\circ$ 이면 유도성 리액턴스, -90° 이면 용량성 리액턴스가 된다.

$$X_q = \frac{\overline{V}_q}{\overline{i}_l} = \frac{V_q \angle \theta_i \pm 90^\circ}{i_l \angle \theta_i} = \frac{V_q}{i_l} \angle \pm 90^\circ \quad (1)$$

2.2 DSSC의 제어 알고리즘

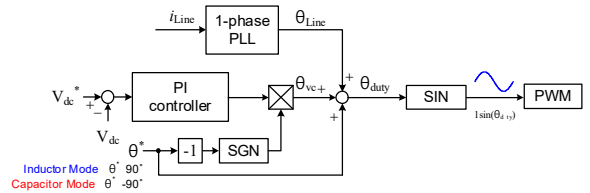


그림 2 DSSC 제어 알고리즘 블록 다이어그램
 Fig. 2 DSSC control algorithm block diagram

DSSC의 보상 동작은 직류링크 전압을 충전하고 충전된 직류링크 전압으로 선로전류 위상의 $\pm 90^\circ$ 인 교류전압을 합성하는 것이다. DSSC의 제어 알고리즘은 그림 2처럼 크게 직류링크 충전을 위한 직류링크 전압제어기(PI)와 선로전류의 위상각 검출을 위한 PLL, 그리고 DSSC의 동작 모드를 결정하는 위상각 지령으로 구성된다. 인버터 스위치에 인가되는 게이팅 신호 펄스폭 변조는 직류링크 전압제어기의 출력(θ_{vc})과 선로전류의 위상각(θ_i), 동작모드 위상 지령($\pm 90^\circ$)이 합쳐진 위상각을 sin함수를 곱하여 만든 정현파와 듀티에 의해 생성된다. 식(2)는 직축 전압의 위상각을 나타내고, 식(3)은 선로전류의 각주파수가 ω 일 때 직축전압을 나타낸다.

$$\theta_{duty} = \theta_i + \theta_{vc} \pm 90^\circ \quad (2)$$

$$V_q = V_{vc} = V_{dc} \sin(\omega t + \theta_i + \theta_{vc} \pm 90^\circ) \quad (3)$$

DSSC의 인버터가 주입하는 전력은 식(4)로 나타낼 수 있다. 교류시스템의 피상전력은 전압과 전류의 곱레복소수로 구할 수 있으며, 인버터(인덕터) 전류는 선로전류의 역상이므로 θ_i 로 표현했다. 여기서 직축전압과 선로전류의 θ_i 성분은 서로 상쇄되어 위상은 $\pm 90^\circ$ 가 되므로 DSSC가 공급하는 전력은 무효전력이 된다. 무효전력 공급은 에너지 소모가 없으므로 직류링크에 충전된 전압은 방전되지 않는다.

$$S_{inv} = V_q i_{ev}^* = (V_{dc} \angle -\theta_i \pm 90^\circ)(I_{ev} \angle +\theta_i) = V_{dc} I_{ev} \angle \pm 90^\circ = \pm jQ_{ev} \quad (4)$$

하지만 직축전압의 위상은 선로전류 위상의 정확히 $\pm 90^\circ$ 가 되지 않는다. 이는 직류링크 전압이 서서히 감소하여 직류링크 전압을 유지하기 위해 직류링크 전압제어기 출력(θ_{vc})이 생성되어 S_{ev} 에 실수 성분(유효전력)이 생긴다. 따라서 인버터는 유효전력을 소모하며, 인버터 기준에서 공급받는 것이므로 유효전력은 항상 음수가 된다.

DSSC가 주입하는 직축전압은 직류링크 전압에 의해 결정되어, 직류링크 전압지령을 어떻게 할 것인가에 따라 제어 대상이 되는 선로 파라미터를 자유롭게 결정할 수 있다.^[3] 본 논문에서는 리액턴스 크기가 다른 두 선로에 각각 DSSC 장치를 설치하고 리액턴스 보상을 함으로써 두 선로에 흐르는 전류와 전달되는 전력을 평준화하는 시스템을 구성했다.

3. 모의실험 및 실험 결과

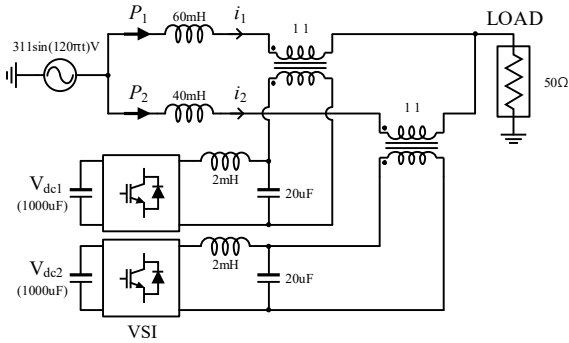


그림 3 DSSC 모의실험 및 실험 시스템 구성도
Fig. 3 DSSC simulation and experiment schematic

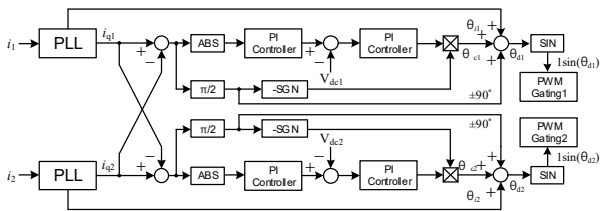


그림 4 DSSC 전류평준화 알고리즘 블록 다이어그램
Fig. 4 DSSC current balancing algorithm block diagram

그림3은 본 논문의 모의실험 및 실험 시스템 회로이며, 리액턴스가 서로 다른 선로에 각각 DSSC가 연결되었다. DSSC로 무효전력을 주입함으로써 i_1 과 i_2 를 평준화하고 두 선로의 전력(P_1 , P_2)이 동일하게 전달되도록 했다. 그림4는 본 논문에서 제안한 전류평준화 알고리즘으로 i_1 과 i_2 의 크기가 같아지도록 한다.

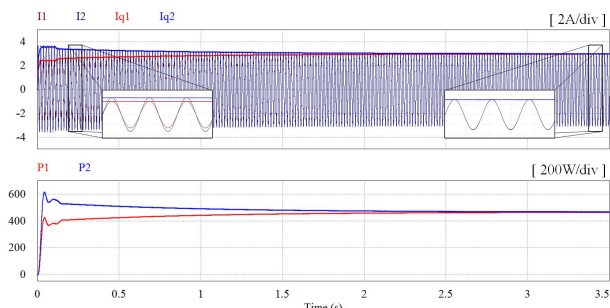


그림 5 전류평준화 모의실험 결과
Fig. 5 Current balancing simulation results

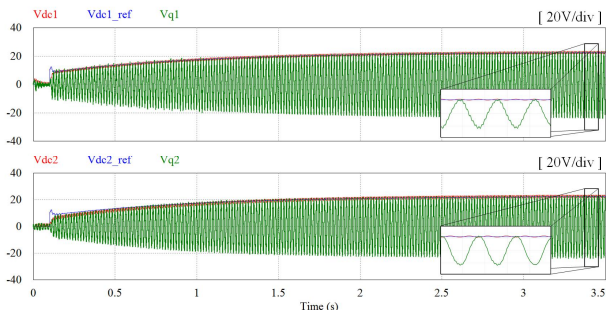


그림 6 직류링크 전압 및 직축전압 모의실험 결과
Fig. 6 DC-Link and quadrature voltage simulation results

그림5에서 시간이 지남에 따라 선로1, 2의 전류와 전력이 평준화되는 것을 볼 수 있으며, 그림6은 각각의 DSSC가 직류링크 전압을 제어하면서 직축전압을 합성하는 파형이다. P_1 , P_2 는 보상 전 374.78W, 562.17W에서 보상 후 465.34W, 468.71W

로 평준화되었다. 이 때 DSSC1은 16.74var, DSSC2는 17.87var의 무효전력을 공급한다.

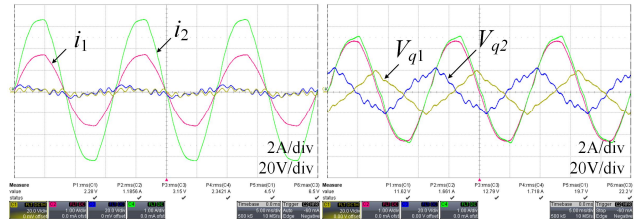


그림 7 DSSC 전류평준화 실험 결과
Fig. 7 DSSC current algorithm experiment result

Urms1	220.47 v	Urms1	220.62 v	Urms1	14.566 v
Irms1	1.6332 A	Irms1	1.9630 A	Urms2	15.300 v
Irms2	2.3196 A	Irms2	1.9790 A	P1	-15.78 w
P1	0.3536 kw	P1	429.22 w	Q1	30.69 var
Q1	0.0644 kvar	Q1	53.02 var	φ1	G117.20 °
P2	505.66 w	P2	431.55 w	P2	-7.155 w
Q2	61.84 var	Q2	47.97 var	Q2	-21.984 var
φ1	G10.33 °	φ1	G7.04 °	φ2	D108.03 °

그림 8 시스템 전력분석 결과
Fig. 8 Result of system power analysis

그림7에서 좌측은 보상 전 파형, 우측은 보상 후 파형으로 i_1 과 i_2 가 DSSC의 무효전력 주입 보상 이후 크기가 동일해지며, DSSC1은 리액턴스 증가를 위해 커패시터 모드, DSSC2는 리액턴스 감소를 위해 인덕터 모드로 동작하여 각 직축전압의 위상이 역상이 될 것을 확인할 수 있다. 그림8은 전력분석기의 결과 값으로 보상전후의 선로 파라미터를 나타낸다. 보상 전 P_1 과 P_2 의 값이 353.6W, 505.6W에서 보상 후 429.22W, 431.55W로 평준화되었다. 그림8의 맨 우측은 보상 후 DSSC에 대한 파라미터 값으로 DSSC1은 30.69var, DSSC2는 21.98var의 무효전력을 공급한다. 이 때 직축전압의 위상이 선로전류 위상의 $\pm 90^\circ$ 가 아닌 것은 앞서 서술한 것처럼 직류링크 전압제어기 출력(V_c)의 영향으로 직류링크 전압제어를 위한 유효전력을 선로로부터 공급받아 소모하기 때문이다.

4. 결론

본 논문의 모의실험 및 실험 결과를 통해 분산 정지형 직렬 보상기(DSSC)의 무효전력 주입 알고리즘 및 DSSC를 이용한 리액턴스 불균형 선로의 전류평준화 알고리즘을 검증했으며, 국내외 개발사례가 매우 적은 DSSC의 기초적인 검증 알고리즘에 대해 정리함으로써 앞으로의 다양한 DSSC 관련 연구 주제를 진행할 수 있는 기반을 마련했다. 또한, 외부전원 없이 리액턴스 보상을 하는 DSSC의 기본 동작 검증은 함으로써 송전선로뿐만 아니라 리액턴스 보상이 필요한 일반 배전선로에도 적용할 수 있어, 또 다른 어플리케이션의 개발 혹은 새로운 연구 주제로 발전할 수 있는 긍정적인 효과도 기대된다. 다음 연구에서는 수전단 전압을 가지는 송전선로 축소모델에 DSSC를 이용하여 리액턴스 보상 및 전력조류제어를 수행하고자 한다.

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선전 기초연구개발과제의 지원 받아 수행된 것임.
[과제번호 : R15XA03 34]

참고 문헌

- [1] D. Divan, et al., "A Distributed Static Series Compensator System for Realizing Active Power Flow Control on Existing Power Lines" IEEE Trans. Power Del., Vol. 22, p. 642-649, 2007, January.
- [2] L. Gyugyi, C. D. Schauder and K. K. Sen, "Static synchronous series compensator: a solid state approach to the series compensation of transmission lines," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, no. 1, pp. 406-417, Jan 1997.
- [3] K. K. Sen, "SSSC static synchronous series compensator: theory, modeling, and application," in IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 13, no. 1, pp. 241-246, Jan 1998.