

# SVC 시스템을 사용한 무효전력 보상



글/이은웅  
충남대학 교수

## 1. 무효전력 보상이란

늘어나는 에너지 비용, 길어진 전송 거리, 대용량 발전기 등의 전력 개발에서, 발전 및 전송시스템이 신뢰성 있고 보다 경제적으로 운영되는 것이 요구되고 있다. 하지만, 가장 효율적인 송전 및 배전시스템에서도, 약간의 전송손실은 불가피하다. 약한(Weak) 네트워크에서는, 이런 손실들을 무시할 수 없다. 그렇기 때문에 전원으로부터 소비자 측으로의 효율적인 전력 전송은 에너지 네트워크 측면에서 중요한 연결고리이다. 따라서, 어떻게 하면 전력의 질을 높여서 전력 소비의 증가를 만족시킬 수 있을까?

모든 교류 전력시스템에 무효전력은 존재하여

안정도에 나쁜 영향을 끼칠 수 있고 유효전력의 불평형과 높은 손실을 동반한다. 그리고 비교적 약한선로로 상호 연결된 전력시스템에서는 전력동요 문제가 자주 발생하기도 한다. 이 전력동요는 전송 능력을 결정하는 한 인자이다. 그러므로, 전력시스템에서 무효전력 보상은 전력발전과 최종의 소비자 사이의 거리를 좁혀주고 보다 많은 전력을 전송할 수 있도록 동요를 줄이는 것이 된다. 따라서, 새로운 발전설비나 전송 선로의 증설의 필요성을 줄이거나 연기할 수 있게 한다[1].

이와 같은 이유로, 전력시스템에서 이루어지는 무효전력보상은 교류 전력시스템에서 전력공급의 질을 높이기 위해 무효전력을 관리하는 것으로 일반적으로 부하보상(Load Compensation)과 전압유지(Voltage Support)의 두 가지 측면으로 볼 수 있다[2].

부하보상의 목적은 부하 역률을 개선하고, 전원으로부터 공급받은 유효전력을 평형하게 하며, 그리고 유동적이고 비선형적인 대용량의 산업 부하에 의해 발생한 고조파전류를 제거하는 것으로, 한 네트워크 단자에 연결된 산업 부하에 대해 극부적인 보상기를 설치함으로써 잘 조정될 수 있다. 역률개선이 가져오는 이점은 교류시스템으로부터 공급받는 무효전력을 감소시킴으로써 동일 유효전력에 대한 전력비용의 절감, 교류시스템 전력용량의 증가, 전압의 안정도 개선, 전력손실의 감소를 가져온다. 다시 말해 역률개선은 전력비용 절감과 유효전력 전송을 증대시키는 전력시스템이 되도록 한다.



전압유지는 전송선로의 한 단자에서 전압의 유동을 감소시키는 것으로 선로에서 공급하는 모든 부하에 대해서 정격 전압을 공급하는 것이다. 예를 들면, 여러 개의 부하와 발전기가 한 전송선로에 연결되어 있을때 전압유지의 목적은 보상하고자 하는 단자에서 전송능력을 증가시키는 것이다. 전송선로로 들어오는 무효전력성분을 조절함으로써 전압유지를 달성할 수 있다. 전송시스템의 무효전력보상은 전송가능 최대전력을 증가시킴으로써 교류시스템의 안정도를 증가시킨다. 또한 전력전송의 모든 단계에서 비교적 균일한 전압 레벨을 만들고 고전압 직류송전(HVDC)의 동작을 개선하고 전송효율을 증가시키며 정상상태를 제어하고 순간적인 과전압을 억제한다.

## 2. 무효전력 보상의 역사

무효전력 보상을 위해 커패시터 뱅크와 동기 보상기 그리고 기계식 개폐 커패시터/인덕터 뱅크가 전통적으로 이용되어 오고 있다. 그런데 최근에는 대전력 반도체 기술과 전자회로의 급진적인 발달로 말미암아 비교적 빠른 응답시간을 가진 싸이리스터 개폐-커패시터(TSC)와 싸이리스터-가변위상 리액터(TCR)가 사용되고 있다.

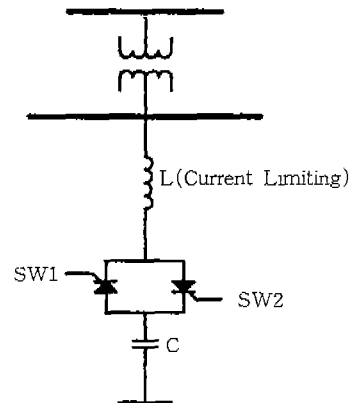
### 2.1 커패시터 뱅크

1914년에 병렬 커패시터가 역률 보정을 위해 처음 도입됐다. 병렬 커패시터를 흐르는 전류는 부하의 지상전류를 보상한다. 병렬 커패시터의 선택 요소는 많은 인자들 중에서 부하가 흡수하는 지상 무효전력의 크기이다. 부하의 크기가 크게 유동하는 경우, 그 부하의 무효전력도 넓은 범위에 걸쳐 변하게 되므로 고정 커패시터 뱅크는 종종 과보상 또는 부족보상을 초래한다. 개폐되는 커패시터를 개폐시킴으로써 가변 무효전력보상을 할수 있다. 이 기계식 개폐 커패시터 뱅크는 전체 무효전력 필요량에 맞춰서, 커패시터 일부가 시스템과 접속 또는 분리된다. 그러므로 무효전력의 부드러운 보상은 단지 커패시터 스위치의 개수에 의존하게 되고 커패시터 스위치는 전자 릴레이와 차단기로 구

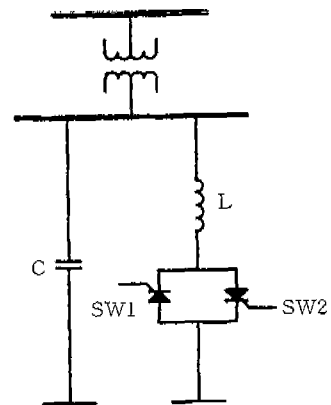
성된다. 그러나, 기계적인 스위치와 릴레이의 사용은 응답이 매우 느리고 신뢰성이 떨어지며 큰 돌입(突入)전류를 발생하고 빈번한 보수유지를 필요로 한다.

### 2.2 사이리스터 개폐 커패시터 (TSC)

그림 1은 사이리스터 개폐 커패시터(TSC)의 기본 구성을 보여준다. 1971년 ASEA에 처음 소개된 이 TSC는 커패시터 뱅크를 적당히 작은 단계들로 분할하고 그 단계들을 양방향성 사이리스터를 사용하여 각각 개폐하며 다단계 제어가 가능하고 고



<그림 1> TSC



<그림 2> TCR

조파가 적다는 장점을 가진다. 그러나, 많은 실용상의 문제점들을 가지고 있다. 무효전력 보상이 비연속적이고 많은 수의 사이리스터가 요구되어 비경제적이며 사이리스터를 과도전압 및 고장전류 등에 대해 외부적인 방법으로 보호하여야만 한다.

### 2.3 사이리스터-가변위상 리액터 (TCR)

사이리스터-가변위상 리액터(TCR)는 사이리스터의 위상각 제어로 연속적인 무효전력을 흡수한다. TCR은 비교적 연속적인 제어가 가능하고, 적당한 과도특성을 가진다. 그러나, 저주파수 대역의 고조파를 발생하고, 유도성 부하 보상시 손실이 증가한다.

## 3. 고체전자 무효전력 보상기 (SVC)

### 3.1 SVC의 특징

최근에 자기전류형 전력 반도체의 눈부신 발전으로 대용량의 커패시터 또는 리액터뱅크없이 무효전력을 발생하거나 흡수하는 고체전자 무효전력 보상기(SVC: Solid-state Var Compensator)에 관심이 집중되고 있다. 이 SVC는 전류형 인버터(CSI)

와 전압형 인버터(VSI) 방식이 있다. 전류형 인버터 방식은 가변 직류전류를 가진 리액터를 이용하고 전압형 인버터 방식은 가변 직류전압을 가진 커패시터를 이용한다.

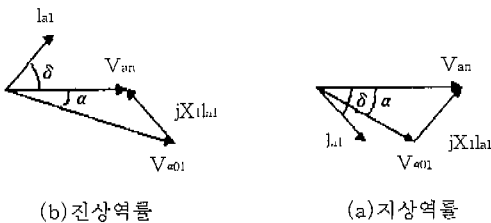
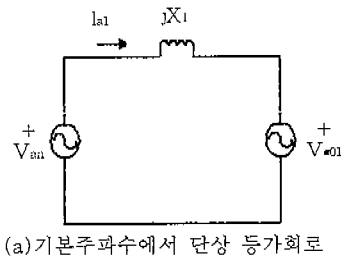
SVC의 주요 장점은 크기가 매우 작고, 많은 수와 큰 용량의 수동소자가 불필요하며 반도체 스위치의 용량감소로 비용의 절감이다. SVC는 크기가 작기 때문에 공간이 중요시되는 응용분야에 매우 적합하다. SVC는 TSC과 TCR과 비교하여 다음과 같은 장점을 가진다.

- i) 지상 및 진상 무효전력 모두를 공급할 수 있으므로 커패시터와 리액터의 상당한 절감이 가능하며 그 결과, 특정조건하에서 공진 가능성이 감소된다.
- ii) 인버터의 시간응답을 전원주파수보다 빠르게 할 수 있으므로, 무효전력을 연속적이고 정확하게 제어할 수 있다.
- iii) 인버터를 펄스폭 변조(PWM) 제어함으로써 전류나 전압고조파 성분이 작게 되므로 필터의 크기를 작게 할 수 있다.
- iv) 돌입전류가 발생하지 않는다.
- v) 전압변동과 과도상태 하에서 동특성이 우수하다.
- vi) 선간전압이 매우 낮은 경우일지라도 정격 무효전력을 발생할 수 있다. 병렬커패시터와 리액터의 전류가 전압에 비해하므로 상용 보상기보다 전송라인을 지지하는 능력이 더 좋다.
- vii) SVC를 적절히 제어하면, 능동 고조파 필터(Active Filter)로서 작용할 수 있다.

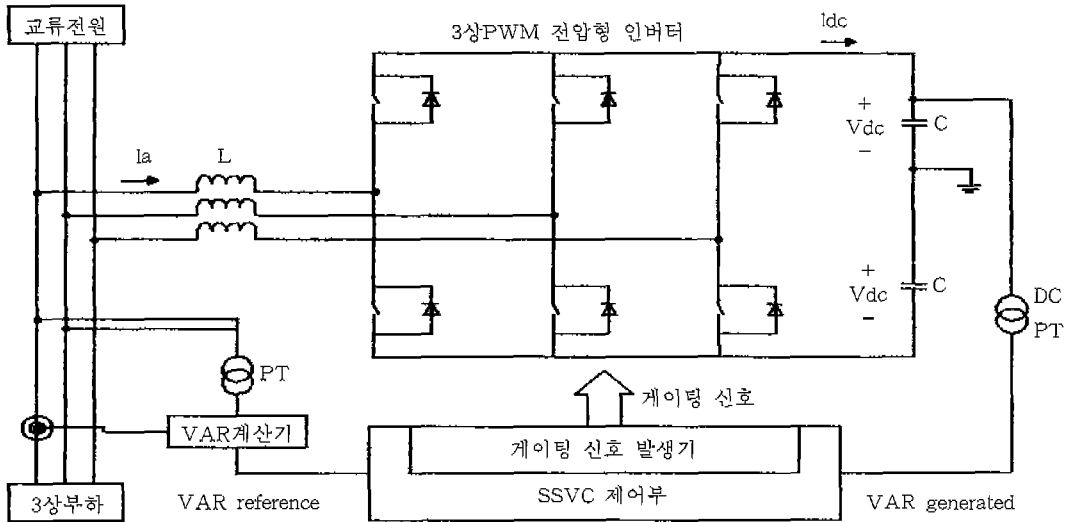
### 3.2 SVC의 동작원리와 구조

SVC의 동작원리는 그림 3에서처럼, 링크 리액터를 통해 전원에 연결된 가변 전압전원으로 간주해서 동기기 이론에 기초해서 설명할 수 있다. 전원과 SVC사이의 피상전력은 식 (1)과 같다.

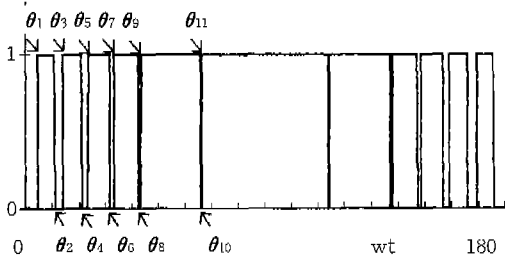
$$S = \frac{V_{an} V_{\alpha n}}{X_l} \sin(\alpha) - j \left\{ \frac{V_{an} V_{\alpha n}}{X_l} \cos(\alpha) - \frac{V_{an}^2}{X_l} \right\} \quad \text{식 (1)}$$



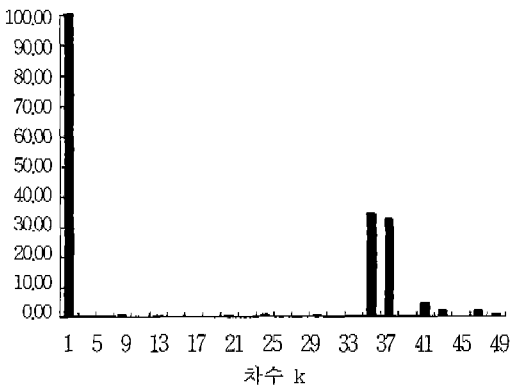
<그림 3> SVC의 동작원리



<그림 4> SVC의 구조



(a) 스위칭 패턴



(b) 선간전압  $V_{ab0}$ 의 주파수 스펙트럼

<그림 5> 최적 PWM 스위칭 패턴

여기서,  $\alpha$ 는 전원의 상전압  $V_{an}$ 과 SVC의 출력상 전압의 기본파성분  $V_{a01}$ 사이의 상차각이다. 그림 3과 수식 (1)은 다음과 같은 시스템 특성을 보여준다.

- i)  $\alpha = 0^\circ$ 이고  $V_{an} < V_{a01}$ 일 때, SVC는 양의 무효전력을 흡수한다.
- ii)  $\alpha = 0^\circ$ 이고  $V_{an} > V_{a01}$ 일 때, SVC는 음의 무효전력을 흡수한다.
- iii)  $\alpha = 0^\circ$ 일때,  $I_{L1}$ 는  $V_{an} - V_{a01}$ 에 직접 비례한다. 따라서 필요한 무효전력을 SVC의 출력전압  $V_{a01}$ 의 진폭을 조절함으로써 정격 진상에서부터 정격 지상까지 조절할 수 있다.

그림 4에 가변전원  $V_{a01}$ 의 실제 회로도를 볼 수 있다. SVC의 전력시스템은 3상 PWM 전압형 인버터이다. 인버터의 교류측 단자는 1차 저역통과 필터인 동기링크  $X_L$ 을 통해 전원과 연결돼 있다. PWM 전압형 인버터의 직류측은 인버터의 입력 리플전류를 운반하면서 무효에너지 저장소자인 직류 커패시터와 연결되어 있다. 자기조절 DC버스를 이용해서 PWM 전압형 인버터가 외부의 직류 전원없이 동작하므로, 상차각  $\alpha$  제어회로를 통해 인버터가 흡수하는 유효전력의 작은 양을 조절해서 인버터의 선간전압  $V_{ab0}$ 를 제어할 수 있다.

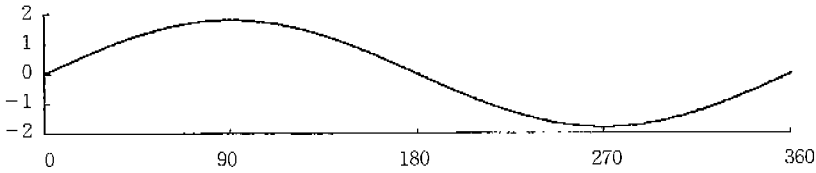
자기조절 DC버스를 이용해서 PWM 전압형 인

버터가 외부의 직류전원없이 동작하므로,  $\alpha$  페루프 제어회로를 통해 인버터가 흡수한 유효전력의 작은 양을 조절해서  $V_{abo}$ 를 제어할 수 있다. 정상 상태 운전 조건에서, PWM 전압형 인버터는 정격 출력전압을 유지한 채, 직류 커패시터와 링크 리액터 그리고 스위칭 손실에 필요한 유효전력을 흡수한다.  $V_{abo}$ 의 진폭을 증가시키기 위해, 작은 (+) 평균값의 전류가 직류커패시터를 순환시켜야 하고,  $V_{dc}$ 는  $V_{abo}$ 가 일정값에 도달할 때 까지 증가한다. 같은 방식으로,  $V_{abo}$ 의 진폭을 낮출 필요가 있을 때, 작은 (-) 평균값의 전류를 직류 커패

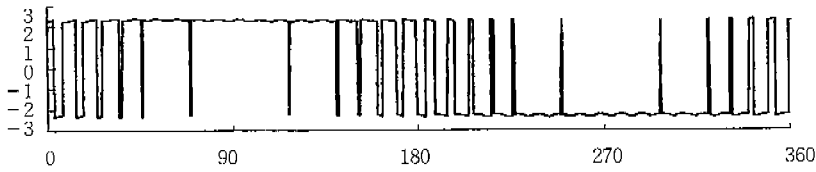
시터를 통해 흘려줘야 한다. 인버터 출력 선간전압  $V_{abo}$ 는 인버터 스위칭 함수의 변조지수(MI)와 직류커패시터 전압  $V_{dc}$ 의 곱인 식 (2)와 같다.

$$V_{abo\ peak} = MIV_{dc} \quad \text{식 (2)}$$

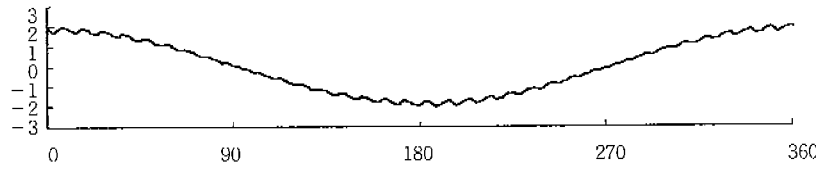
PWM 전압형 인버터에 인가되는 최적 스위칭 패턴은 그림 5(a)와 같다. 그림 5(b)에서, 스위칭 패턴으로 발생된 선간전압  $V_{abo}$ 의 주파수 스펙트럼을 나타낸것으로 선택된 스위칭 패턴이 출력 전압  $V_{abo}$ 의 저차 고조파를 효과적으로 감소시킴을



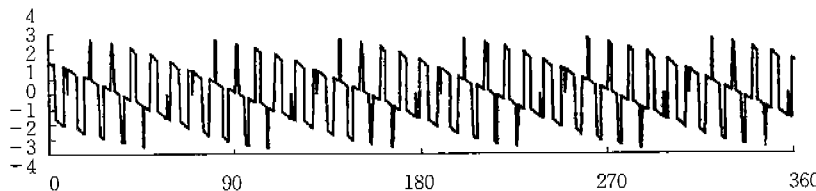
(a) 교류전원 전압  $V_{an}$



(b) 인버터 출력전압  $V_{ao}$



(c) 교류 선전류  $I_a$



(d) 직류커패시터 전류  $I_{dc}$

<그림 6> 정상 무효전력 보상에 대한 SVC의 전압/전류 파형



확인할 수 있다.

### 3.3 SVC의 지상 무효전력 보상의 예제

그림 6은 정격 지상 무효전력 보상에 대해 SVC 시스템의 전류 및 전압 파형을 나타낸 것이다.

그림 6(a)는 교류전원 전압을 나타냈고, 그림 6(b)는 인버터의 출력 상전압을 나타냈다. 그림 6(c)는 교류 선전류를 나타낸 것으로 교류 전원전류가 5%이내의 적은 전고조파왜곡율(THD)을 가짐을 알 수 있다. 그림 6(d)는 직류 커패시터를 흐르는 전류를 나타낸다.

교류선전류  $I_a$ 는 전원전압  $V_{an}$ 에 대해 진상  $90^\circ$ 의 위상차를 갖는다. 따라서 SVC가 흡수하는 진상 무효전력은 식 (3)과 같고 부하가 흡수하는 지상 무효전력과 크기가 같으므로 전원측이 공급하는 무효전력은 거의 0에 가깝다.

$$VAR \approx 3V_{an}I_a \sin 90 = 3V_{an}I_a \quad \text{식 (3)}$$

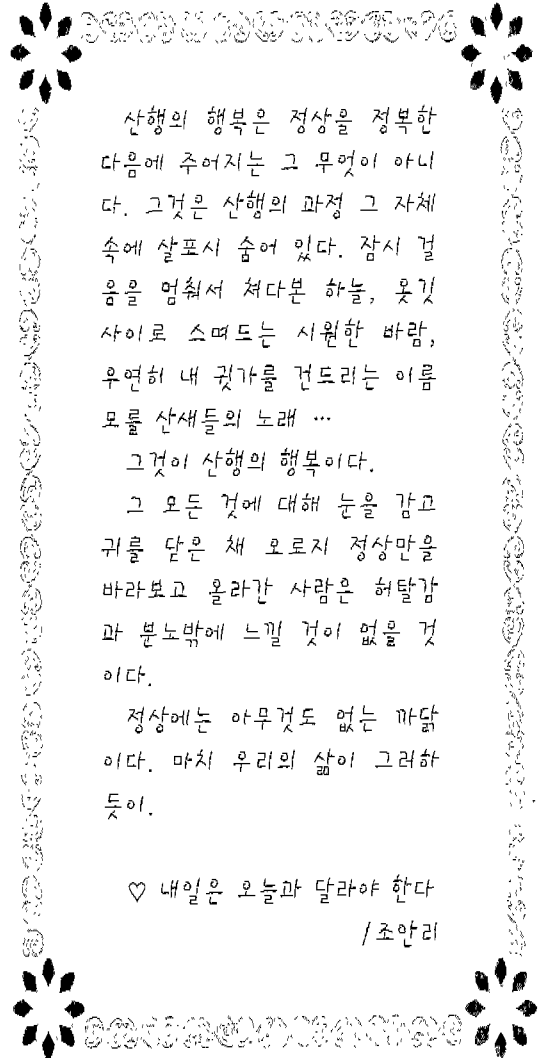
## 4. 맺음말

산업 성장과 생활향상은 전력사용량을 증대시키고 있고 더 많은 전력생산을 위한 발전소의 신설이 요구되고 있다. 그러나, 발전소는 엄청난 초기 투자와 운영비 그리고 발전자원이 필요하다.

그래서, 새로운 발전소의 건설보다는 기존의 건설된 발전 용량을 손실없이 최대한 이용하는 기술 개발이 무엇보다도 시급하다. 특히 1차 에너지 자원이없는 우리나라에서는 효율적 전력사용이 무엇보다도 중요하다. 그러므로 SVC기술로 무효전력을 보상하여 역률을 개선함으로써 산업용 설비의 낮은 역률로 인해 쓸데없이 발전 및 배전 설비 용량을 증대시킴을 막고 송배전 손실의 증가를 줄일 수 있음을 소개했다.

현재 미국, 일본 등 기술 선진국들은 TSC 등의 무효전력 보상 장치를 자체 개발, 생산하고 있으며 제품의 종류도 380/660V의 중소 용량급에서 400kV 이상의 초고압, 대용량에 이르기까지 다양하다. 특히, SVC는 100MVA급까지 개발되고 있다 [3].

SVC에 대한 국내의 기술현황은 관심을 갖고 연구하는 연구자가 극히 드물며, 특히 대용량 설비의 경우 국내의 독자적인 생산기반기술이 전무하여 전량 수입에 의존하고 있는 형편이다. 그렇기 때문에, 이 분야에 대한 기술 개발은 더 이상 지체되어서는 안될 것이다. 그리고 1차 자원이 부족한 우리 나라에서는 정책적으로 기술개발해야만 한다. SVC에 대한 연구의 실현은 전력사용의 효율을 증대시키기 때문에 발전소 증설보다 더욱 경제성있으며 기술의 선도적 위치를 확보한다면 세계적인 경쟁력을 갖출 수 있는 기술이 될 것이다.



산행의 행복은 정상을 정복한  
다음에 주어지는 그 무엇이 아니다.  
그것은 산행의 과정 그 자체  
속에 살포시 숨어 있다. 잠시 걸  
음을 멈춰서 쳐다본 하늘, 못길  
사이로 스며드는 시원한 바람,  
우연히 내 귓가를 건드리는 이름  
모를 산새들의 노래 ...

그것이 산행의 행복이다.

그 모든 것에 대해 눈을 감고  
귀를 닫은 채 오로지 정상만을  
바라보고 올라간 사람은 허탈감  
과 분노밖에 느낄 것이 없을 것  
이다.

정상에는 아무것도 없는 가뭇  
이다. 마치 우리의 삶이 그러하  
듯이.

♡ 내일은 오늘과 달라야 한다

/조안리