

STATCOM을 이용한 지역간 응동전력 증대방안에 관한 연구

김양일, 정성원, 신운용, 광상운, 김재현
국립 순천대학교 정보통신공학부

A Study on Enhancement Available Transfer Capability Using STATCOM

Yang-il Kim, Sungwon Jeung, Woonyong Shin, Sang-un Kwak, Jaehyeon Gim
School of Information & Communication Engineering, Suncheon National Univ

Abstract - Recently electrical industry has been rapidly restructured by deregulation in the developed countries. The voltage stability problem of a power system is associated with a rapid voltage drop due to heavy load and it occurs because of inadequate reactive power supply at some critical buses. More effective power system control means for line flow and bus voltage are required for applying FACTS.

In this paper Jacobian method used to study on the voltage stability, The Jacobian method is to check the eigenvalue of the load flow Jacobian matrix. If the power system is unstable, one of the eigenvalues, at least, has crossed the imaginary axis. This paper demonstrate enhancement of ATC by application of STATCOM at WSCC 9-bus system.

1. 서 론

전력산업의 구조개편에 따라 전력계통의 운영방식은 전력시장에 경쟁을 도입하여 경영 효율화를 추구하고 있다. 그러나 전력산업의 공공성과 안전성 보다는 각 전력회사의 이윤추구로 계통의 계획과 운영이 원활히 수행되지 않는다면 전력계통의 안정적인 운영은 기대하기 어려우며 이는 전력부족과 미국 동북부와 같은 대규모 정전 사태를 발생시킬 것이다. 전력계통의 붕괴는 여러 가지 복합적인 원인으로 있지만 전압안정도 문제가 원인으로 분석되는 경우가 많다.[1] 무효전력 수급 불균형으로 인한 특정 부하단의 전압저하는 계통의 손실을 증가시키고 부하에 공급하는 전력의 부족을 초래하고 심각한 경우에는 전력계통의 붕괴에까지 이르게 된다.

이러한 문제점을 해결하고 보완하기 위한 방법으로 전력조류, 전압, 안정도와 같은 계통특성을 개선하여 전력수송 능력을 증진하고 설비의 이용률을 증대하기 위한 방법으로 FACTS 설비가 활발한 연구 및 운용중에 있다.[2] FACTS 설비 중 STATCOM은 전압원 인버터와 직류캐패시터로 구성되어 무효전력을 흡수 또는 공급을 하는 것으로 모선의 전압크기를 조정한다.[3]

본 논문에서는 Jacobian Matrix의 Eigen-value[4]를 이용하여 취약한 모선을 선정하고 STATCOM으로 전압안정도 범위 내에서 각 지역간 응동전력을 분석하였다.

2. 본 론

2.1 STATCOM(Static Synchronous Compensator) 모델

STATCOM은 그림 2.2와 같이 결합 변압기, DC를 AC로 변환하는 컨버터 및 DC 전원을 저장할 수 있는 장치로 구성되어 있다. 여기서 z_{SR} 은 모선 S와 R사이의

선로 임피던스이고, V_{sh} 는 컨버터의 출력 전압이다. V_s 는 S모선의 전압, z_{sh} 는 결합변압기 임피던스이다. 컨버터에서 발생한 전원은 발전기에서 생성된 전원과 같은 주파수의 정현파이며 전압의 크기와 위상을 제어할 수 있다.

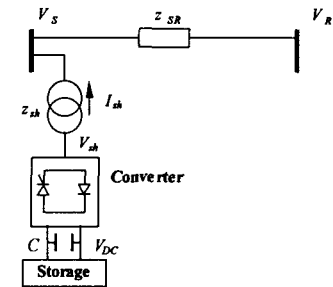


그림 2.2 STAATCOM 구조도
Fig 2.2 Structure of STATCOM

그림 2.3은 STATCOM의 등가회로이다. 컨버터에서 공급되는 전압 V_{sh} 로 치환하고 결합 변압기의 임피던스 z_{sh} 이다.

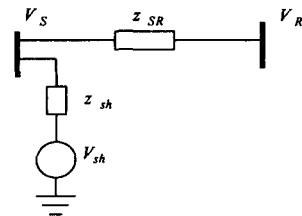


그림 2.3 STATCOM 모델
Fig 2.3 STATCOM Model

컨버터 전압 V_{sh} 와 결합 변압기의 임피던스를 이용하여 전류원으로 나타내는 등가회로는 그림 2.4와 같이 표현된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$I_{sh} = \frac{V_s - V_{sh}}{z_{sh}} \quad (2.1)$$

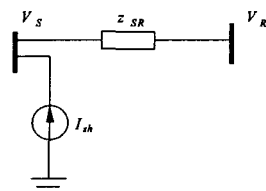


그림 2.4 STATCOM의 전류 등가회로
Fig 2.4 Current Equivalent Circuit of STATCOM

이 전류원을 모선 전압 V_s 의 기준 축으로 한 실수부와 허수부로 나눌 수 있다.

$$I_{sh} = I_{shp} + jI_{shq} \quad (2.2)$$

2.2 자코비안 법

전력계통에서 전압불안정을 예측하는 방법들은 정적상태와 동적상태로 나눌 수 있는데 동적인 방법은 계산시간과 결과들을 분석하기 위해 매우 많은 시간을 필요로 하며 현재도 많은 연구가 진행중에 있다. 반면 정적인 방법은 주로 자코비안 행렬의 특이치를 찾는 방법과 전압붕괴와 현재의 운전점까지의 거리를 제시해 주는 전압붕괴 근접도 지표를 찾는 방법이 주로 사용되고 있다.[6] 따라서 전력방정식을 Newton Raphson 방법에 적용시키면, 다음과 같은 자코비안 행렬을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_\theta & F_v \\ G_\theta & G_v \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \theta \\ \Delta V \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

- 여기서, ΔP : 모선에서 유효전력 증가분
- ΔQ : 모선에서 무효전력 증가분
- $\Delta \theta$: 모선전압 위상각 증가분
- ΔV : 모선전압 크기의 증가분
- F_θ : 유효전력과 모선전압 위상각의 함수
- F_v : 유효전력과 전압크기의 함수
- G_θ : 무효전력과 모선전압 위상각의 함수
- G_v : 무효전력과 전압크기의 함수

앞의 자코비안 행렬식 값의 부호가 바뀌게 되면 고유치들 중 하나라도 허수축을 교차하게 되고 안정영역에서 불안정영역으로 이동된다. 이 고유치들이 허수축의 왼쪽에 있을 때 그 시스템은 안정하다고 할 수 있다.

2.3 가용송전용량 계산(ATC)

신뢰도 한계 내에서 효율적인 운용을 추구하기 위한 방식으로 송전선을 안정적으로 운용하면서 상업적 이용을 확대하기 위하여 기존의 사용하고 있는 송전 용량에 추가적으로 사용할 수 있는 용량의 중요성이 확대되고 있다. 이에 대한 척도로 송전계통에 주어진 시간동안 사용하지 않고 남아 있는 용량을 가용송전용량(Available Transfer Capability : ATC)이라고 한다.

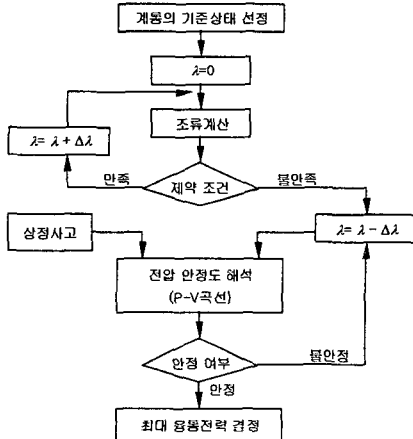


그림 2.5 최대 용통전력 산정을 위한 흐름도
Fig. 2.5 Flow Chart for Total Transfer Capability

전력의 생산과 소비 과정에 이르기까지 전력의 거래는 앞으로 매우 빨라질 것으로 예상된다. 따라서 ATC를 정확하고 빠르게 계산하는 것이 중요하게 되었다.

ATC를 계산하기 위해 기존의 연속조류 방법(Continuous Power Flow : CPF)은 정확하지만 계산시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있고, PTDF(Power Transfer Distribution Factor)방법은 선로조류 변화를 선형적으로 근사화하여 전송용량을 계산하기 때문에 짧은 계산시간의 장점을 가지고 있지만 큰 오차를 보이고 있다.[5]

본 논문에서는 조류계산을 반복하여 계산하는 반복조류계산(Repeated Power Flow : RPF)방법을 사용하여 정상 상태에서 전체 송전 용량을 계산한다. 계산 절차는 그림 2.5와 같다.

3. 모의실험

3.1 9모선계통

모의 실험 계통은 WSCC 9모선 계통을 이용하였으며 그림 3.1에서와 같이 3개의 지역으로 나누어 모의실험을 실시하였다. 모든 모선의 전압은 0.95~1.05[PU] 범위에 있으며 과부하 되는 선로가 없게 선로용량을 선정하였으며, 스윙모선은 1번 모선이다.

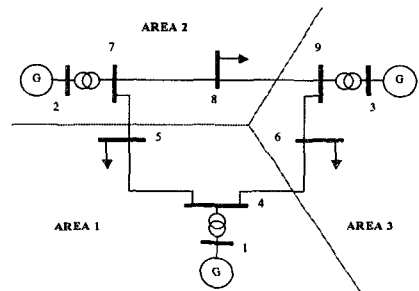


그림 3.1 WSCC 9모선 계통
Fig 3.1 WSCC 9Bus System

3.2 모의실험 결과

모의실험은 Jacobian Matrix를 이용하여 조류계산을 수행하고 여기서 Eigen-value를 구하여 가장 취약한 모선을 선정하고 STATCOM으로 보상을 실시하여 각 지역간 용통전력을 증진하였다.

- Case 1 표 1은 기준 값으로 9모선 계통의 발전량과 부하량의 기준 값을 나타내었다.

표 1 9모선계통의 기준 값
Table 1 Base Case of 9Bus System

| AREA | Generation | | Load | | Loss | |
|-------|------------|--------|-------|--------|------|--------|
| | [MW] | [Mvar] | [MW] | [Mvar] | [MW] | [Mvar] |
| 1 | 71.6 | 27.04 | 125.0 | 50.0 | 2.72 | 54.12 |
| 2 | 163.0 | 6.65 | 100.0 | 35.0 | 0.56 | 48.51 |
| 3 | 85.0 | 10.80 | 90.0 | 30.0 | 1.35 | 35.62 |
| Total | 319.6 | 22.89 | 315.0 | 115.0 | 4.63 | 138.25 |

표2는 기준 값의 각 지역별 용통전력 값을 나타내었다.

표 2 기준시 각 지역간 용통전력(Base Case)
Table 2 Transfer Power of Each Areas

| AREA | 1 | | 2 | | 3 | |
|------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|
| | P | Q | P | Q | P | Q |
| 1 | - | - | -84.32 | 11.31 | 30.70 | 1.03 |
| 2 | 86.62 | 8.38 | - | - | 24.10 | 24.30 |
| 3 | 30.54 | 16.54 | 24.18 | 3.12 | - | - |

표3은 Jacobian Matrix의 Eigen-value 값을 나타낸 것으로 5번 모선이 음의 부호 값을 나타내고 있어 가장 취약한 모선으로 선정되었다.

표 3 9모선계통의 Eigen-value
Table 3 Eigen-value of 9Bus System

| Bus No. | Eigen-value | |
|---------|-------------|------------|
| | ΔP | ΔQ |
| 4 | 0.00 | 0.00 |
| 5 | -0.41 | 0.00 |
| 6 | 3.98 | 0.66 |
| 7 | 16.71 | 2.56 |
| 8 | 17.74 | 1.33 |
| 9 | 20.87 | 1.23 |

표3의 결과에 따라 취약한 모선 순위인 5번, 4번 모선지역에 STATCOM으로 보상을 하고 용통전력 증진효과를 비교한 결과를 표 4와 5에 나타내었다. 표에서 보여지는 것과 같이 기준 값과 비교하여 용통전력이 향상됨을 보였다.

표 4 STATCOM 보상시 각 지역간 용통전력
Table 4 Transfer Power of Each Areas(on Bus5)

| AREA | 1 | | 2 | | 3 | |
|------|--------|--------|--------|------|--------|--------|
| | P | Q | P | Q | P | Q |
| 1 | - | - | -84.36 | 9.45 | 30.73 | 1.40 |
| 2 | 86.65 | -10.47 | - | - | -24.13 | -23.95 |
| 3 | -30.56 | -16.96 | 24.21 | 2.73 | - | - |

표 5 STATCOM 보상시 각 지역간 용통전력
Table 5 Transfer Power of Each Areas(on Bus4)

| AREA | 1 | | 2 | | 3 | |
|------|--------|-------|--------|--------|--------|--------|
| | P | Q | P | Q | P | Q |
| 1 | - | - | -84.06 | -19.20 | 30.58 | -5.78 |
| 2 | 86.44 | 0.69 | - | - | -23.92 | -24.53 |
| 3 | -30.42 | -9.05 | 24.01 | 3.59 | - | - |

- Case 2 용통전력을 증가시키기 위하여 각 지역의 부하와 발전량을 같은 비율로 증가시켜 표 6에 나타내었고 모의 실험을 한 결과 λ 는 0.774까지 증가하였다. 이는 부하를 77.4[%]까지 증가할 수 있다는 것이다. 가장 취약한 모선은 표7에 나타낸 것과 같이 Eigen-value는 기준 값의 결과와 다르게 4번, 5번 모선 순으로 나타났다.

표 6 시스템 증가시 각 지역간 용통전력
Table 6 Transfer Power of Each Areas

| AREA | 1 | | 2 | | 3 | |
|------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|
| | P | Q | P | Q | P | Q |
| 1 | - | - | -144.07 | -10.33 | 57.0 | 25.51 |
| 2 | 152.28 | 24.46 | - | - | -42.22 | -45.67 |
| 3 | -56.23 | -35.85 | 42.62 | 28.99 | - | - |

표 7 시스템 증가시 Eigen-value
Table 7 The Result of Eigen-value

| Bus No. | Eigen-value | |
|---------|-------------|------------|
| | ΔP | ΔQ |
| 4 | -0.69 | 0.00 |
| 5 | 0.00 | 0.00 |
| 6 | 3.69 | 0.53 |
| 7 | 19.89 | 1.15 |
| 8 | 4.43 | 0.00 |
| 9 | 16.47 | 1.33 |

표8과 9는 표7의 결과에 의하여 가장 취약한 모선 순으로 모선 4번과 5번에 STATCOM으로 보상을 하여

지역간 용통전력이 향상됨을 보였다. 이때의 λ 는 각각 0.972, 0.885까지 증가하였다.

표 8 STATCOM 보상시 각 지역간 용통전력
Table 8 Transfer Power of Each Areas(on Bus4)

| AREA | 1 | | 2 | | 3 | |
|------|--------|-------|---------|-------|-------|-------|
| | P | Q | P | Q | P | Q |
| 1 | - | - | -159.02 | 1.35 | 64.26 | 42.25 |
| 2 | 169.09 | 22.33 | - | - | -47.0 | 51.60 |
| 3 | -63.13 | 51.09 | 47.53 | 36.26 | - | - |

표 9 STATCOM 보상시 각 지역간 용통전력
Table 9 Transfer Power of Each Areas(on Bus5)

| AREA | 1 | | 2 | | 3 | |
|------|--------|--------|---------|-------|--------|--------|
| | P | Q | P | Q | P | Q |
| 1 | - | - | -154.89 | 28.45 | 62.35 | 37.16 |
| 2 | 163.44 | -15.62 | - | - | -46.53 | -41.22 |
| 3 | 63.36 | -47.07 | 46.93 | 24.14 | - | - |

모의실험의 결과에 나타난 것과 같이 Jacobian Matrix의 Eigen-value를 이용하여 취약한 모선에 STATCOM으로 보상시 각 지역간 용통전력이 향상됨을 보였다. 따라서 앞으로 국내에 적용될 FACTS 설비의 좋은 지표가 되리라 예상된다.

4. 결 론

현재 국내의 전력수요는 해마다 증가추세에 있으며 또 한 국내에 추진중인 전력산업 구조개편은 전력시장에 더욱 혼잡을 가중시키고 있어 지역간 용통전력의 중요성이 대두되고 있다. 이에 대한 대비책으로 FACTS 설비를 최적의 위치에 선정하는 것은 각 지역간 용통전력을 증진하고 전력계통의 안정도를 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문은 Jacobian Matrix의 Eigen-value를 이용하여 취약한 모선을 선정하고 STATCOM을 설치하여 용통전력이 증진됨을 입증하였으며 전압안정도를 향상시키는 자료로 활용할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 산업자원부 전력산업연구개발사업 전력기술기초연구에 의하여 이루어진 연구로서, 관계 부처에 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York, 1994
- [2] "Flexible AC Transmission System", IEEE Spectrum, pp.40-48, April 1993
- [3] L Gyugyi, "Application Characteristics of Converter Based FACTS Controller", International Conference on Power System Technology, 2000.
- [4] M.M. Salama, E.M. Saied, S.M. Abdel-Maksoud, "Steady State Voltage Instability Assessment in a Power System", Elsevier Science Ltd. pp59-69, 1999
- [5] 이효상, 최진규, 신동중, 김진오, "전력산업 구조개편에 대비한 적정 TRM 및 ATC 결정에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제53권3호, pp.129-134, 2004.03,
- [6] Y. L. Chen, "Weak Bus Oriented Reactive Power Planning for System Security", IEE Proc. vol. 143, No. 6, pp541-545, November 1996,