

계통연계 풍력발전시스템의 무효전력 보상에 대한 시뮬레이션

(Simulation of Reactive Power Compensation
in Grid-Connected Wind Power Generation System)

노경수* · 장보경

(Kyoung-Soo Ro · Bo-Kyoung Jang)

Abstract

Reactive power support is considered to be necessary for dealing with a voltage stability issue with wind turbine system employing squirrel-cage induction generator(SCIG). This paper analyses steady-state characteristics of the SCIG wind turbine system by simulating torque-slip characteristics of SCIG with respect to variations of interconnecting network strength and generator terminal voltage. It also presents dynamics analysis of SCIG wind turbine system on Simulink to investigate the impact of static var compensator(SVC) and static synchronous compensator(STATCOM) on transient stability enhancement. It analysed transient stability with varying fault duration times and compared the transient stability characteristics with varying rated capacities of SVC and STATCOM. It is shown that the STATCOM has a better performance and reactive power support compared to SVC.

Key Words : SCIG, Wind Turbine, Reactive Power Compensation, SVC, STATCOM

1. 서 론

21세기에 접어들어 자원의 고갈과 에너지 수요의 증가로 인해 세계적으로 신재생에너지 이용에 대한 요구가 증가되고 있다. 그 중에서 풍력발전은 다른 발전 설비에 비하여 가격대비 에너지 효율이 높아 가장 주목받는 대체에너지 중의 하나이다. 가장 일반적인 유도발전기는 농형 유도발전기(SCIG, squirrel-cage induction generator)로서 계통에 직접 연결되며 전압

조정과 위상 조절이 필요하지 않아 전기적 시스템이 비교적 간단하다. 하지만 SCIG는 운전범위의 회전속도가 거의 일정하기 때문에 풍력이용률이 낮으며 무효전력을 필요로 하기 때문에 역률도 낮은 단점이 있다. 이를 보상하기 위해 유도발전기 단자에 전력용 커패시터 뱅크를 설치하여 무효전력을 보상하는 것이 일반적이며 커패시터 뱅크의 비용이 저렴한 반면 실시간 보상이 어렵다는 단점이 있다[1].

연계계통에서 고장이 발생하면 SCIG의 단자전압은 크게 감소하며 발전기의 전자기적 토크도 감소하게 된다. 그러나 고장상황에서 발전기의 기계적 입력토크는 거의 변하지 않으며 두 토크의 차이때문에 발전기는 가속하게 된다. SCIG의 슬립이 증가함에 따라

* 주저자 : 동국대학교-서울 전자전기공학부 교수
Tel : 02-2260-3346, Fax : 02-2260-3346
E-mail : ksro@dgu.ac.kr
접수일자 : 2011년 3월 23일
1차심사 : 2011년 3월 25일
심사완료 : 2011년 5월 11일

연계계통으로부터 흡수하는 무효전력도 증가하게 된다. 고장이 해소된 후 많은 양의 무효전력을 필요로 하며 이 양이 제공되지 않으면 SCIG의 회전속도는 제어할 수 없는 수준으로 된다. 이런 불안정 상태를 방지하기 위해 SVC와 STATCOM같은 무효전력보상장치가 설치되어야 한다. 이러한 무효전력보상장치는 선로와 병렬로 연결되어 실시간으로 선로에 무효전류를 주입 또는 흡수함으로써 SCIG에서 필요로 하는 무효전력을 제공한다. SVC는 부하 측 모선에 설치되며, 모선전압의 변동을 감지하여 이에 대응하는 병렬 서셉턴스를 변화시켜 모선전압을 연속적으로 제어하는 기기이다. 기본적인 제어 목적은 모선전압을 안정시키는 것이며 부가적으로 과도안정도 향상 등의 효과도 얻을 수 있다. STATCOM도 무효전력 제어설비인 SVC와 유사한 기능을 제공하지만 SVC는 인버터 설비가 아닌 단순 사이리스터 스위칭 소자를 이용하여 콘덴서 뱅크나 리액터 뱅크를 제어한다는 점에서 차이가 있다[2].

풍력발전 시스템의 무효전력 보상에 관한 연구동향으로 SVC를 설치하여 고장상황에서 SCIG 풍력발전시스템의 과도안정도를 개선하고자 하였으며 [3], STATCOM을 적용하여 SCIG 풍력발전시스템의 전압안정도가 개선되는 것을 시뮬레이션으로 증명하고 있다[4-5]. 약한 계통에 대용량 풍력발전시스템의 연계를 용이하게 하기 위하여 정상상태에서 STATCOM의 영향을 분석하였으나[6], 고장상황에 대한 STATCOM의 안정도 향상에 대한 해석은 제시되지 않고 있다. 한편 이중역자 유도발전기를 이용한 풍력발전시스템의 출력단의 부하모선 전압 및 무효전력을 제어하기 위해 SVC와 STATCOM이 제시되었으나[7], 각각의 특성분석이 미흡하며 SVC와 STATCOM의 특성비교도 이루어지지 않았다. SCIG 풍력발전시스템의 LVRT(low voltage ride through) 능력의 향상을 위해 STATCOM의 사용을 제안하여 SVC와 비교하였다[8]. 그러나 고장상황에서 SVC와 STATCOM의 과도안정도 향상에 미치는 영향에 대한 시뮬레이션 비교는 없으며 안정도 유지를 위한 SCIG 파라미터 변화에 대한 SVC와 STATCOM의 용량을 제시하고 있다.

본 논문에서는 발전기 연계선로 및 발전기 단자전압 변화에 대한 토크-슬립 특성에 대한 시뮬레이션을 수행하여 SCIG 풍력발전시스템의 정상상태 특성을 해석하고자 하며, SVC와 STATCOM의 과도안정도 향상에 미치는 영향을 분석하기 위한 동특성 해석을 Simulink상에서 수행하고자 한다. 그리고 고장 지속 시간의 변화에 따른 SCIG 풍력발전시스템의 과도안정도를 해석하고 안정도 개선을 위한 SVC와 STATCOM의 정격용량 변화에 대한 안정도 특성을 비교, 분석하고자 한다.

2. SCIG의 정상상태 특성 해석

계통연계 농형 유도발전기(SCIG)의 정상상태에서의 등가회로는 그림 1과 같다. 그림에서 R_s, L_s 는 각각 고정자권선의 저항과 누설 인덕턴스를 나타내고, R_r, L_r 은 각각 회전자권선의 저항과 누설 인덕턴스를 나타낸다. R_m, L_m 은 각각 계통에 연계되는 선로의 저항과 리액턴스를 나타내며, L_m 은 자화 인덕턴스를 나타낸다. C_{pfc} 는 역률개선용 커패시터를 나타내며, I_s, I_r, I_m 은 각각 고정자권선의 전류, 회전자권선의 전류, 자화 전류를 나타낸다. V_s, V_n 은 각각 고정자권선의 단자전압과 계통연계지점의 전압을 나타내며, s는 회전자의 슬립을 나타낸다.

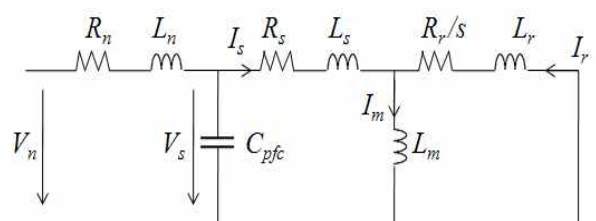


그림 1. 계통연계 SCIG의 정상상태 등가회로
Fig. 1. Steady-state equivalent circuit of grid-connected SCIG

그림 1의 등가회로에서 연계선로의 강약 및 발전기 단자전압의 변화에 대해 SCIG의 정상상태 토크-슬립 특성을 분석하기 위해 유도된 토크-슬립 관계식은 다음과 같다.

$$T_e(s) = \frac{V_s^2}{2\pi f} \cdot \frac{R_r/s}{R_{eq}^2(s) + X_{eq}^2(s)} \quad (1)$$

여기서 $R_{eq} = R_s + R_r/s$, $X_{eq} = \omega(L_s + L_r)$
 f 는 계통의 주파수를 나타낸다.

유도기가 계통주파수의 동기속도 이상으로 회전하게 되면 전력을 계통으로 공급할 수 있는 유도발전기로 동작하게 된다. 계통으로 전력을 공급하기 위해 동기속도보다 빠르게 회전하면 음의 슬립을 가지며 유도발전기의 출력이 증가함에 따라 슬립은 음의 값으로 증가하게 된다. 위의 식 (1)을 이용하여 계통연계 SCIG 풍력발전시스템의 파라미터 값의 변화에 따른 정상상태 특성을 시뮬레이션하여 그 결과를 그림 2와 그림 3에 나타내고 있다.

그림 2는 연계선로의 강약에 따른 토크와 슬립과의 관계를 나타낸 곡선이다. 일반적으로 연계선로의 길이가 길면 선로의 임피던스가 크게 되어 약한 연계가 되며, 반대로 연계선로의 길이가 짧으면 강한 연계라고 볼 수 있다. 그림 2를 보면 약하게 연계된 경우보다 강한 연계선로로 연계된 경우 유도발전기가 최대 토크에 이르는 회전속도가 더 크다는 것을 알 수 있다.

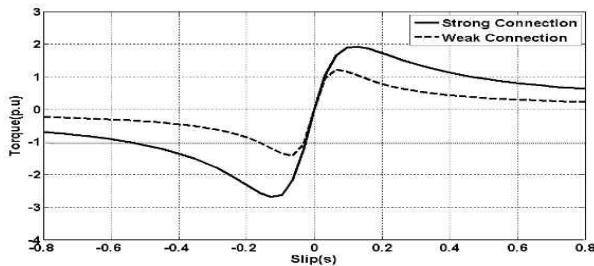


그림 2. 연계선로 강약에 따른 SCIG의 토크-슬립 곡선
 Fig. 2. Torque-slip curves of SCIG for interconnecting line strength

계통연계 풍력발전시스템에서 예상치 못한 사고가 발생하면 SCIG의 단자전압이 떨어지게 되고 이것은 유도발전기의 전기적 토크의 변화를 유발한다. 그림 3은 고정자권선의 단자전압의 변화에 따른 전기적 토크와 슬립과의 관계를 보여준다. 고정자권선의 단자전압이 증가하면 출력토크도 상승한다는 것을 알 수

있으며 이는 식 (1)의 토크 관계식과도 일치한다. 아울러 단자전압의 감소는 SCIG의 최대 토크의 감소를 유발하며, 따라서 큰 단자전압 감소는 발전기가 불안정하게 될 가능성이 커진다는 것을 알 수 있다.

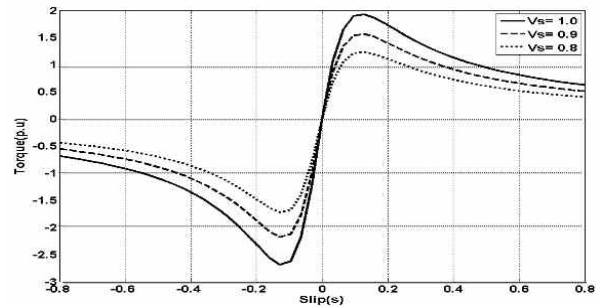


그림 3. 단자전압 변화에 대한 SCIG의 토크-슬립 곡선
 Fig. 3. Torque-slip curves of SCIG for V_s variation

3. SCIG 시스템의 동특성 사례연구

SCIG를 이용한 계통연계 풍력발전시스템에 대해 SVC 및 STATCOM을 통한 무효전력 보상에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위하여 그림 4와 같이 풍력발전이 병행 2회선 연계선로를 통하여 연계된 간단한 배전계통을 설정하였다. 3[MW] 풍력발전시스템은 출력전압이 690[V]이며 1.5[MW] SCIG 풍력터빈 2개로 구성되어 있다.

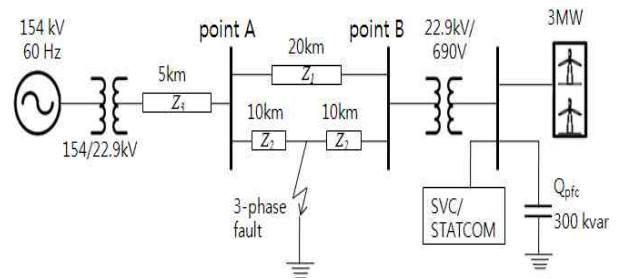


그림 4. SCIG 계통연계 풍력발전 시스템의 개요도
 Fig. 4. Scheme of grid-connected SCIG wind turbine system

본 연구에서는 SCIG 풍력발전시스템의 무효전력보상에 대한 특성을 살펴보기 위하여 MATLAB/

Simulink를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표 1은 본 시뮬레이션에서 사용한 풍력발전시스템의 데이터를 나타내고 있다. 다음에는 고장지속시간의 변화에 따른 풍력발전시스템의 동작특성과 무효전력보상을 위한 SVC 및 STATCOM의 정격용량 변화에 따른 동작특성을 살펴보고, SVC와 STATCOM의 동작특성을 비교하고자 한다.

3.1 풍속변화에 대한 동작 특성

그림 5는 100초 동안 풍속의 변화를 나타내며 이 풍속이 풍력터빈에 인가되었을 경우 SCIG 풍력발전시스템의 출력특성에 대한 시뮬레이션 결과가 그림 6과 그림 7에 나타나 있다.

표 1. SCIG 풍력발전 시스템의 데이터
Table 1. Data for SCIG wind turbine system

정격 출력	3[MW]
단자 전압/주파수	690[V]/ 60[Hz]
R_s/R_r	0.0049[pu] / 0.0055[pu]
L_s/L_r	0.0924[pu] / 0.0995[pu]
L_m	3.9528[pu]
정격 풍속	13[m/s]
Q_{pk}	300[kvar]
(가공)연계선로 R	0.1153[Ω /km]
(가공)연계선로 X	0.3958[Ω /km]

그림 6은 풍속의 변화에 따른 SCIG 풍력발전의 유효전력과 무효전력 출력의 변화를 보여준다. 풍속이 정격풍속 이상일 때 풍차는 피치각 조절을 이용하여 발전기가 정격출력을 추종하도록 제어되어 이 구간에서 유효전력 출력의 변동이 거의 없음을 볼 수 있다. 발전기 유효전력 출력이 변동함에 따라 발전기가 흡수하는 무효전력 또한 변동하게 되며 그 값이 상당함을 알 수 있다.

그림 7은 풍속변화에 따른 회전자속의 회전속도 변화를 보여주고 있으며 앞에서의 발전기 출력변동에 비

해 회전속도 변화는 거의 없는 것을 알 수 있다. SCIG 풍력발전시스템은 여자기와 조속기가 설치되어 있지 않기 때문에 풍속 변동에 대하여 풍차날개의 피치제어로 출력을 조절해야 하므로 일정한 출력을 생산하는 회전자속의 회전속도가 제한되는 특성이 있기 때문이다.

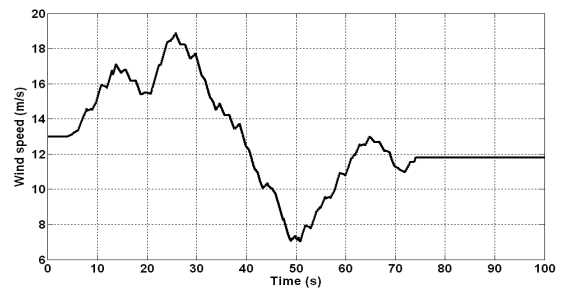


그림 5. 풍속변화
Fig. 5. Wind speed variation

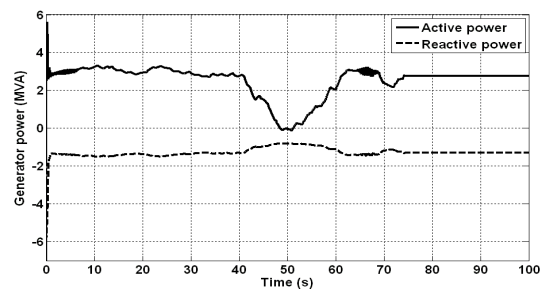


그림 6. 풍속 변화에 대한 발전기 출력
Fig. 6. Generator power output for wind speed variation

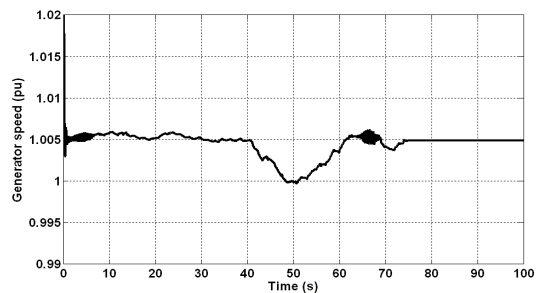


그림 7. 풍속 변화에 대한 발전기 회전속도
Fig. 7. Generator rotational speed for wind speed variation

3.2 고장 지속시간의 변화에 따른 동작 특성

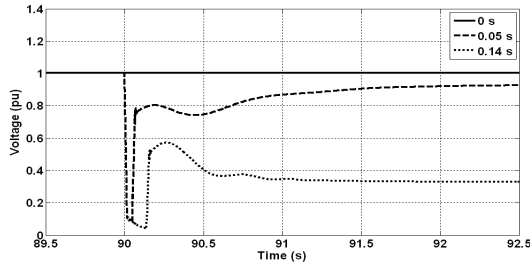


그림 8. 고장 지속시간 변화에 대한 발전기 단자전압
Fig. 8. Generator terminal voltage for fault lasted time

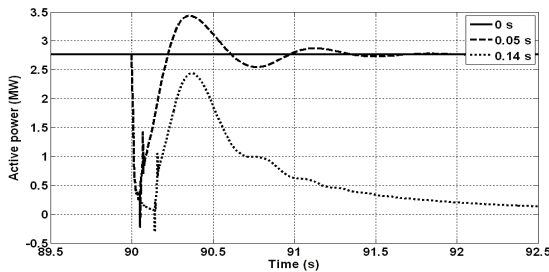


그림 9. 고장 지속시간 변화에 대한 발전기 유효전력
Fig. 9. Generator active power output for fault lasted time

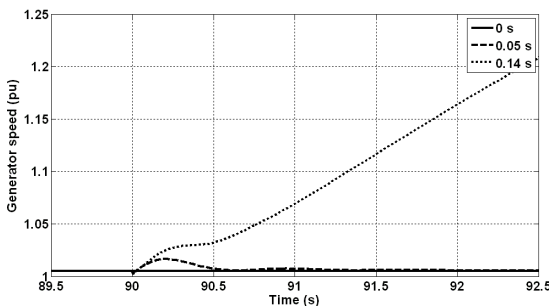


그림 10. 고장 지속시간 변화에 대한 발전기 회전속도
Fig. 10. Generator rotational speed for fault lasted time

그림 8은 선로에 고장이 발생하지 않은 정상상태와 90초에 병행 2회선 선로 중 한 선로의 중앙에 3상 단락고장이 각각 0.05초, 0.14초 지속된 경우의 SCIG 발전기 단자전압의 변화를 보여준다. 고장이 발생하지 않은 경우 발전기 단자전압은 일정하게 유지되고 있

는 반면 고장 발생 후에는 단자전압이 감소하게 되어 고장 지속시간이 짧으면 설치된 전력용 커패시터 뱅크(PFC)의 무효전력보상으로 단자전압이 회복되지만 고장 지속시간이 길어지면 무효전력보상이 충분치 못하여 발전기 단자전압이 회복되지 못하는 것을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 고장 지속시간의 변화에 대한 발전기 유효전력과 발전기 회전속도의 변화를 각각 보여준다. 고장 지속시간이 짧은 경우 고장해소 후 발전기 단자전압 회복과 더불어 발전기 유효전력과 회전속도도 정상상태 값으로 회복하게 되며, 고장 지속시간이 길어지면 고장해소 후 발전기 유효전력과 회전속도는 정상상태로 복귀하지 못하고 불안정하게 된다는 것을 알 수 있다.

3.3 SVC와 STATCOM의 정격용량에 따른 동작 특성

앞 절에서 고장 지속시간이 0.14초일 때 고장해소 후 계통이 불안정하게 되는 경우를 선택하여 안정화 방안에 대해 살펴보기로 한다. 고장발생 후 SCIG 풍력발전시스템이 불안정하게 되는 원인은 발전기가 과도하게 무효전력을 흡수하기 때문이며 설치된 PFC만으로는 무효전력이 불충분하기 때문에 추가적인 무효전력보상장치가 필요하다. 다음에는 대표적인 무효전력보상장치인 SVC 및 STATCOM을 그림 4와 같이 설치하여 이들의 동작특성을 제시하고 있다.

3.3.1 SVC 정격용량에 따른 동작 특성

그림 11~13은 그림 4에 설치되는 SVC의 정격용량 변화에 따른 고장해소 후 발전기 단자전압, 유효전력 및 회전속도의 변화를 보여준다. 고장 지속시간이 0.14초일 때 무효전력보상장치가 설치되지 않은 경우 발전기가 불안정하게 되는 것을 보았으며 1[Mvar]의 SVC를 설치하였을 경우 안정도 특성은 개선되지 못하고 있다. 이는 1[Mvar]의 SVC 용량은 0.14초 동안의 고장 해소 후 시스템을 안정하게 하기에는 부족하다는 것을 말해 준다. SVC의 정격용량을 2[Mvar]로

증가하면 발전기 단자전압 및 회전속도 등이 안정하게 개선되고 있으며, SVC의 정격용량을 3[Mvar]로 증가하면 발전기 단자전압 및 회전속도 등이 보다 빠르게 안정하게 됨을 알 수 있다.

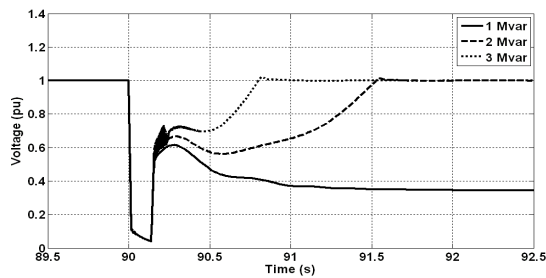


그림 11. SVC 용량 변화에 대한 발전기 단자전압
Fig. 11. Generator terminal voltage for SVC capacity

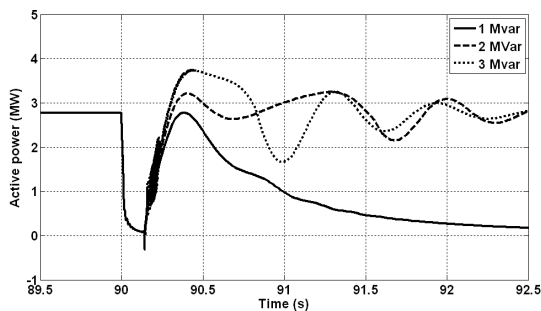


그림 12. SVC 용량 변화에 대한 발전기 유효전력
Fig. 12. Generator active power for SVC capacity

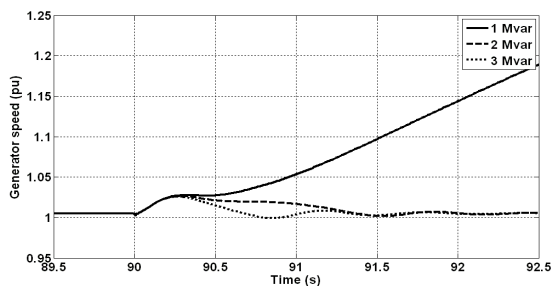


그림 13. SVC 용량 변화에 대한 발전기 회전속도
Fig. 13. Generator rotational speed for SVC capacity

3.3.2 STATCOM 정격용량에 따른 동작특성

그림 14~16은 그림 4에 설치되는 STATCOM의 정

격용량 변화에 따른 고장해소 후 발전기 단자전압, 유효전력 및 회전속도의 변화를 보여준다. 시뮬레이션 결과는 SVC를 설치한 경우와 유사하게 나타나고 있으며, STATCOM의 용량변화로 발전기 단자에서의 출력 변동이 상당부분 개선된 것을 볼 수 있다. 1[Mvar]의 STATCOM 설치로는 0.14초 동안의 고장

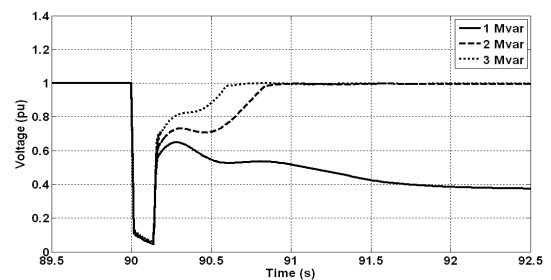


그림 14. STATCOM 용량에 대한 발전기 단자전압
Fig. 14. Generator terminal voltage for STATCOM capacity

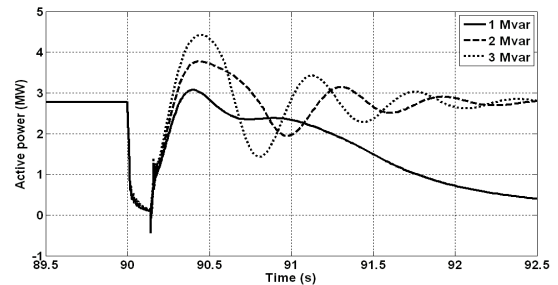


그림 15. STATCOM 용량에 대한 발전기 유효전력
Fig. 15. Generator active power for STATCOM capacity

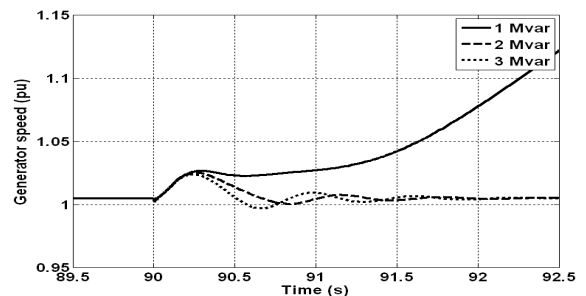


그림 16. STATCOM 용량에 대한 발전기 회전속도
Fig. 16. Generator rotational speed for STATCOM capacity

해소 후 시스템을 안정하게 회복시키지 못하고 있으며, 2[Mvar]의 용량보다 3[Mvar]의 경우가 더 빠르게 시스템을 안정하게 함을 알 수 있다. STATCOM은 필요로 하는 무효전력제어를 능동적으로 수행함으로써 발전기 단자전압 및 회전속도 등의 변동을 크게 감소시켜 시스템 안정도 향상에 기여한다고 볼 수 있다.

3.4 SVC와 STATCOM의 동작 특성 비교

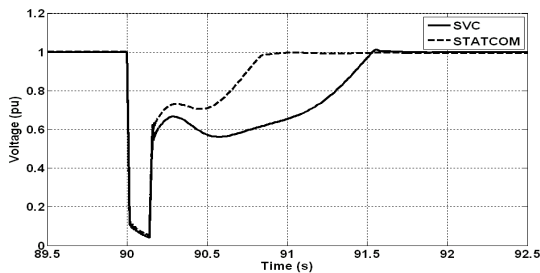


그림 17. SVC와 STATCOM의 발전기 단자전압 비교
Fig. 17. Comparison of generator terminal voltage of SVC and STATCOM

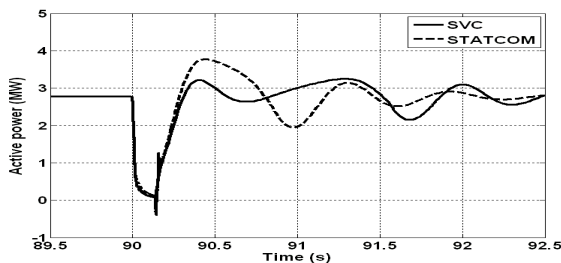


그림 18. SVC와 STATCOM의 발전기 유효전력 비교
Fig. 18. Comparison of generator active power of SVC and STATCOM

SVC와 STATCOM의 무효전력 보상능력을 비교하기 위하여 앞 절에서의 동작특성 중에서 이들의 설치 용량이 2[Mvar]인 경우의 시뮬레이션 결과를 살펴보았다. 그림 17~19는 2[Mvar]의 SVC 및 STATCOM에 대해 0.14초 동안의 고장해소 후 발전기 단자전압, 유효전력 및 회전속도의 비교를 보여준다. 결과적으로 사이리스터 스위칭 소자를 이용하여 콘덴서 뱅크나 리액터 뱅크를 제어하는 SVC보다 인버터 설비를 갖는 STATCOM의 경우가 발전기 단자전압 및 회전

속도 등을 빠르게 안정되게 함을 알 수 있으며, 따라서 STATCOM이 무효전력 보상에 더 효과적임을 알 수 있다.

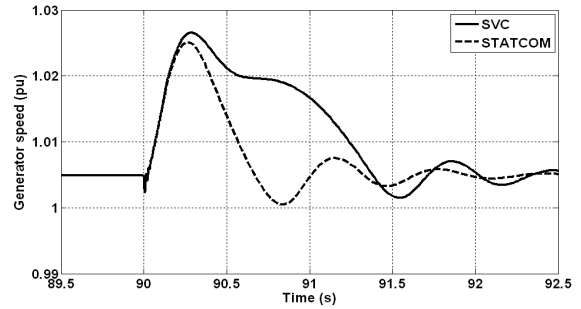


그림 19. SVC와 STATCOM의 발전기 회전속도 비교
Fig. 19. Comparison of generator rotational speed of SVC and STATCOM

4. 결론

본 논문에서는 SCIG의 정상상태 특성 해석을 수행하였으며, 과도안정도 개선을 위한 SVC와 STATCOM의 영향을 분석하기 위해 SCIG 풍력발전 시스템의 동특성을 MATLAB/Simulink상에서 시뮬레이션하였다. 고장 지속시간의 변화에 따른 SCIG의 과도안정도를 해석하였으며 고장상황에서 SCIG의 동특성을 개선하기 위해 무효전력보상장치인 SVC와 STATCOM의 동작특성을 비교, 분석하였다. 시뮬레이션 수행을 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

- 연계선로가 강하게 연계되거나 또는 발전기 단자전압이 큰 경우에 SCIG의 최대 토크가 더 크게 나타났다.
- 고장 지속시간의 변화에 따른 SCIG 풍력발전 시스템의 동특성을 분석하였으며 고장 지속이 어느 값 이상이 되면 발전기 단자전압 및 회전속도 등이 불안정해진다.
- 대표적인 무효전력보상장치인 SVC 및 STATCOM의 정격용량 변화에 따른 시스템의 동특성 향상효과를 검토하였으며, SVC와 STATCOM의 동작특성을 비교하여 STATCOM의 동작특성이 보다 효과적이라는 것을 알 수 있었다.

References

- [1] M. Godoy Simoes and Felix A. Farret, "Alternative Energy Systems-Design and Analysis with Induction Generators", CRC Press, 2008.
- [2] Philip P. Barker, Robert W. de Mello, "Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part1- Radial Distribution Systems." IEEE .Power Engineering Society Summer Meeting, 2000, pp. 1645-1656.
- [3] C. Chompoo-inwai, et al., "Reactive Compensation Techniques to Improve the Ride-Through Capability of Wind Turbine During Disturbance", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 41, No. 3, 2005, pp. 666-672.
- [4] L. Qi, J. Langston, M. Steurer, "Applying a STATCOM for Stability Improvement to an Existing Wind Farm with Fixed-Speed Induction Generators", 2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century, pp. 1-6.
- [5] H. Gaztanaga, et. al, "Real-Time Analysis of the Transient Response Improvement of Fixed-Speed Wind Farms by using a Reduced-Scale STATCOM Prototype", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 22, No. 2, May 2007, pp. 658-666.
- [6] Chong Han, et. al., "STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 1, March 2008, pp. 226-233.
- [7] Ali Ozturk, Kenan Dosoglu, "Investigation of the control voltage and reactive power in wind farm load bus by statcom and svc", International Conference on Electrical and Electronics Engineering, 2009. pp. 60-64.
- [8] M. Molinas, J.A. Suul and T. Undeland, "Low Voltage Ride Through of Wind Farms with Cage Generators: STATCOM versus SVC", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 23, No. 3, May 2008, pp. 1104-1117.

◆ 저자소개 ◆



노경수(盧炘洙)

1963년 3월 27일생. 1985년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1997년 미국 Virginia Tech 전기공학과 졸업(박사). 2005년 미국 Arizona State University 방문교수. 현재 동국대학교(서울) 전자전기공학부 교수.



장보경(張寶璟)

1985년 9월 12일생. 2009년 동국대학교 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 LIG넥스원 연구원.